



Universidad
Carlos III de Madrid

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un explosor de esferas para aplicaciones de Alta Tensión

Titulación: Grado de Ingeniería Eléctrica

Autor: José Tomás González González

Tutor: Juan Manuel Martínez Tarifa

Leganés, Septiembre 2014

Agradecimientos

“Si se cree y se trabaja, se puede”

Diego Pablo Simeone.

A Juan Manuel Martínez Tarifa, por hacer posible la realización de este Trabajo Fin de Grado y por su constante disposición y ayuda.

A mis padres, José Tomás y María del Carmen y mi hermana Leticia por el apoyo durante estos años.

A mis compañeros de clase y amigos Charly, Guille, Jacobo, Javi, Tena y Yela, amigos de Viñales Enrique, Joni, Óscar y Rober, a mi gran amiga Marta, compañeros Erasmus y resto de personas que han contribuido a lo largo de estos años.

Resumen

En el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se va a estudiar el fenómeno de ruptura dieléctrica en gases, concretamente en aire. Para ello se ha modelado un explosor de esferas sobre el cuál se han realizado una serie de ensayos para poder determinar la tensión crítica de ruptura dieléctrica del aire.

Tras describir los objetivos del TFG, se muestra una introducción en la cual se define el explosor de esferas, sus aplicaciones y se muestran conceptos básicos para poder desarrollar y entender el TFG.

Una vez realizada la introducción, se dedica un capítulo a los cálculos necesarios para el dimensionado del explosor de esferas acorde con los estándares internacionales y posteriormente se describen los ensayos realizados y analizan los datos obtenidos.

Finalmente se incluye el presupuesto y el cronograma donde se presentan las distintas fases y tiempo empleado en cada una de ellas, finalizando con las conclusiones obtenidas a la finalización de TFG.

ABSTRACT

This Final Degree Thesis will study the phenomenon of breakdown in gases, specifically in air. For this purpose, it will design a sphere gap in which there have been some test to determine the peak value of breakdown in air.

After describe the aims of the Final Thesis, there is an introduction where is defined the sphere gaps, their uses and some basics notion about it which help to develop and to understand the Final Thesis.

To continue, there is a chapter which includes the calculus needed for the design of the sphere gap according to with the international standard and the next chapter shows the test and the test results.

At the end of this Final Thesis is shown the budget and the schedule where are described the different stages and the number of hours used in each, and terminated with the conclusions obtained at the end of the Final Thesis.

Índice

Índice de figuras	7
Índice de tablas	9
1.Objetivos	11
2. Explosor de esferas	12
2.1 Ruptura dieléctrica de un gas.....	13
2.2 Aplicaciones del explosor de esferas	19
2.2.1. Voltímetros de cresta	19
2.2.2 Circuitos de generación de transitorios	22
3. Dimensionado del explosor de esferas	33
3.1. Radio de las esferas.....	33
3.2. Radio de los cilindros.....	34
3.3. Distancia entre esferas.....	37
3.4. Diseño eléctrico.....	40
3.4.1. Propuesta de diseño eléctrico inicial	40
3.4.2. Propuesta de diseño eléctrico final.....	42
3.5. Modelado de la estructura de soporte	44
3.6. Dimensionado del explosor de esferas y su estructura	46
4. Ensayos.....	49
4.1. Descargas parciales	49
4.2. Determinación de tensión de ruptura dieléctrica para impulso de tensión alterna a 50 Hz.....	53
4.2.1. Tensión de ruptura dieléctrica aplicando tensión alterna a 50 Hz. GAP 1 cm.	56
4.2.2. Tensión de ruptura dieléctrica aplicando tensión alterna a 50 Hz. GAP 3,7 cm.	58
4.2.3. Tensión de ruptura dieléctrica aplicando tensión alterna a 50 Hz. GAP 4,5 cm.	59
4.2.4. Tensión de ruptura dieléctrica aplicando tensión alterna a 50 Hz. GAP 5,5 cm.	61
4.2.5. Resumen datos de rigidez dieléctrica aplicando tensión alterna a 50 Hz.	63
4.3. Determinación de tensión de ruptura dieléctrica aplicando impulsos de tensión tipo rayo	64
4.3.1. Impulso tipo rayo. Polaridad positiva. GAP 1 cm	69
4.3.2. Impulso tipo rayo. Polaridad negativa. GAP 1 cm	71
4.3.3. Impulso tipo rayo. Polaridad positiva. GAP 3,7 cm	73
4.3.4. Impulso tipo rayo. Polaridad negativa. GAP 3,7 cm	75

4.3.5. Resumen datos de rigidez dieléctrica aplicando impulsos de tensión tipo rayo a 50 Hz.....	77
5. Presupuesto.....	78
6. Cronograma.....	80
7. Conclusiones.....	81
ANEXO I: DESCARGAS PARCIALES	82
Anexo II: Facturas	86
Referencias bibliográficas	89

Índice de figuras

Figura 2.1: Esquema de explosor de esferas.....	12
Figura 2.2: Explosor de esferas.....	13
Figura 2.3: Corriente de un gas frente a tensión aplicada.....	14
Figura 2.4: Mecanismo de ionización.....	15
Figura 2.5: Curva de Paschen.....	17
Figura 2.6: Disposición típica de electrodos en “barra-barra” para medidas en alta tensión.....	20
Figura 2.7: Impulso tipo maniobra normalizado. T_p : Tiempo de frente, T_2 : Tiempo de cola y T_d : Tiempo por encima del 90% de tensión.....	22
Figura 2.8: Forma de impulso tipo rayo normalizado.....	23
Figura 2.9: Circuitos de generación de impulsos.....	24
Figura 2.10. Circuito de transformada de Laplace.....	25
Figura 2.11: Onda de tensión del impulso y sus componentes según los circuitos mostrados en la figura 2.9.....	27
Figura 2.12: Eficiencia (η) de ambos circuitos.....	28
Figura 2.13: Circuito generador de impulsos básico seis etapas (generador de Marx)...	30
Figura 2.14: Generador de impulsos multi-etapa con descargas distribuidas y resistencias de frente.....	31
Figura 3.1.- Dimensiones de un explosor de esferas.....	35
Figura 3.2.- Distribución del campo eléctrico a lo largo del eje M-M' de esfera a esfera para varios valores de la relación S/R.....	38
Figura 3.3.- Primera propuesta de diseño.....	44
Figura 3.4.- Propuesta final de diseño.....	45
Figura 3.5.- Diseño definitivo acotado con distancia entre esferas nula.....	46
Figura 3.6.- Diseño definitivo acotado con distancia entre esferas máxima.....	47
Figura 4.1: Explosor de esferas con calibrador integrado.....	50
Figura 4.2: Diagrama PRPD de descargas parciales con tensión alterna $U= 28,9$ kV...	51
Figura 4.3: Diagrama PRPD de descargas parciales con tensión alterna $U=122,8$ kV...	52

Figura 4.4: Diagrama PRPD de descargas parciales con tensión alterna $U=140$ kV	52
Figura 4.5: Montaje del circuito de generación de impulsos de alta tensión en corriente alterna a frecuencia 50 Hz y explosor de esferas.....	55
Figura 4.6: Representación de datos obtenidos para distancia de separación 1 cm.....	57
Figura 4.7: Representación de datos obtenidos para distancia de separación 3,7 cm....	59
Figura 4.8: Representación de datos obtenidos para distancia de separación 4,5 cm....	61
Figura 4.9: Representación de datos obtenidos para distancia de separación 5,5 cm....	62
Figura 4.10: Esquema método “Up and down”.....	65
Figura 4.11: Ejemplo ilustrativo de método “Up and down”.....	65
Figura 4.12: Forma de onda de impulso de tensión tipo rayo sin ruptura dieléctrica con polaridad positiva.....	66
Figura 4.13: Forma de onda de impulso de tensión tipo rayo con ruptura dieléctrica con polaridad positiva.....	66
Figura 4.14: Forma de onda de impulso de tensión tipo rayo sin ruptura dieléctrica con polaridad negativa.....	67
Figura 4.15: Forma de onda de impulso de tensión tipo rayo con ruptura dieléctrica con polaridad negativa.....	67
Figura 4.16: Circuito empleado para la generación impulsos de tensión tipo rayo junto con el explosor de esferas.....	69
Figura I.1: Ejemplos de defectos en el interior de aislantes sólidos.....	82
Figura I.2: Fenómeno y ejemplo de patrón característico de descarga parcial interna...83	
Figura I.3: Fenómeno y ejemplo de patrón característico de descarga parcial superficial.....	84
Figura I.4: Fenómeno y ejemplo de patrón característico de descarga parcial efecto corona.....	84
Figura II.1: Factura de la madera empelada para la estructura de sujeción del explosor de esferas.....	86
Figura II.2: Factura de las ruedas para el soporte del explosor de esferas.....	87
Figura II.3: Factura del aluminio empleado para el explosor de esferas.....	88

Índice de tablas

Tabla 2.1: Valores de las constantes A y B para distintos gases y rangos de E/p.....	17
Tabla 2.2.- Valores pico de tensiones en descargas disruptivas ($V_{50\%}$ valores de prueba de impulso) en kV para tensión alterna a frecuencia de red, tipo rayo e impulsos tipo maniobra.....	21
Tabla 2.3: Valores de las constantes de tiempo $1/\alpha_1$ y $1/\alpha_2$ para distintos impulsos normalizados.....	29
Tabla 3.1.- Dimensiones de un explosor de esferas.....	36
Tabla 3.2.- Valores pico de tensiones en descargas disruptivas ($V_{50\%}$ valores de prueba de impulso) en kV para tensión alterna a frecuencia de red, tipo rayo e impulsos tipo maniobra.....	39
Tabla 4.1: Tensiones de ruptura dieléctrica para separación de 1 cm aplicando tensión en corriente alterna a 50 Hz y sus respectivas probabilidades acumuladas.....	56
Tabla 4.2: Relación de datos obtenidos para distancia de separación 1 cm.....	57
Tabla 4.3: Relación de datos obtenidos para distancia de separación 3,7 cm.....	58
Tabla 4.4: Relación de datos obtenidos para distancia de separación 4,5 cm.....	60
Tabla 4.5: Relación de datos obtenidos para distancia de separación 5,5 cm.....	62
Tabla 4.6: Resumen de tensiones de ruptura dieléctrica obtenidas.....	63
Tabla 4.7. Resultados de la aplicación de método “Up and down” para impulso de tensión tipo rayo con polaridad positiva y distancia de separación entre esferas 1 cm...70	
Tabla 4.8. Resultado de los ensayos clasificados por el nivel de tensión aplicado.....	70
Tabla 4.9. Resultados de la aplicación de método “Up and down” para impulso de tensión tipo rayo con polaridad negativa y distancia de separación entre esferas 1 cm..72	
Tabla 4.10. Resultado de los ensayos clasificados por el nivel de tensión aplicado.....	72
Tabla 4.11. Resultados de la aplicación de método “Up and down” para impulso de tensión tipo rayo polaridad positiva y distancia de separación entre esferas 3,7 cm.....	74
Tabla 4.12. Resultado de los ensayos clasificados por el nivel de tensión aplicado.....	74
Tabla 4.13. Resultados de la aplicación de método “Up and down” para impulso de tensión tipo rayo polaridad negativa y distancia de separación entre esferas 3,7 cm.....	76
Tabla 4.14. Resultado de los ensayos clasificados por el nivel de tensión aplicado.....	76

Tabla 4.15. Resumen de tensiones de ruptura dieléctrica obtenidas aplicando impulso de tensión tipo rayo.....	77
Tabla 4.16: Comparación de tensiones de ruptura dieléctrica obtenidas.....	77
Tabla 5.1: Coste de los materiales para la construcción del soporte de sujeción.....	78
Tabla 5. 2: Coste del aluminio para la fabricación del explosor de esferas.....	78
Tabla 6.1: Desglose de las fases del TFG y horas empleadas en cada de ellas.....	80
Tabla 6.2: Diagrama de Gantt del TFG.....	80

1.Objetivos

Un explosor de esferas en un elemento compuesto por dos esferas del mismo diámetro enfrentadas y con una distancia de separación entre ellas limitada cuya función es limitar la tensión o actuar de interruptor en diferentes ensayos.

El objetivo de este TFG es el diseño de un explosor de esferas para aplicaciones de Alta Tensión (AT). Una vez fabricado, se realizarán ensayos para determinar la tensión crítica de ruptura dieléctrica del aire aplicando Alta Tensión. Para ello, el diseño del explosor de esferas ha de cumplir con todos los requisitos técnicos establecidos por los estándares y normativas internacionales al respecto así como con el presupuesto disponible para éste propósito. Una de las motivaciones para llevar a cabo este TFG es que en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid no hay ninguno.

Para determinar la tensión de ruptura dieléctrica se realizaran ensayos para distintas separaciones entre esferas normalizadas y una vez obtenidos los datos, se compararán con las tensiones de ruptura dieléctrica previstas por los estándares internacionales y con las obtenidas de manera teórica. Para ello, en primer lugar se medirá la actividad de descargas parciales en el explosor y a continuación se realizarán dos ensayos con el explosor de esferas, en el primero de ellos se aplicará tensión a 50 Hz hasta producir la ruptura dieléctrica y en el segundo de ellos se le aplicará impulsos de tensión tipo rayo.

2. Explosor de esferas

Dos esferas metálicas del mismo diámetro, situadas sobre el mismo eje y con una distancia de separación entre ellas limitada y regulada, forman un explosor de esferas. Hay dos disposiciones típicas, de eje vertical y de eje horizontal y en ambas una de las dos esferas está conectada a la fuente de alta tensión (esfera superior en el caso de disposición vertical) y la otra está conectada directamente a tierra. En la figura 2.1 se muestra un ejemplo esquemático de un explosor de esferas, en el cual se muestran sus elementos y las distancias mínimas que se han de cumplir, las cuales se tratarán en sucesivos capítulos durante el dimensionado del explosor de esferas.

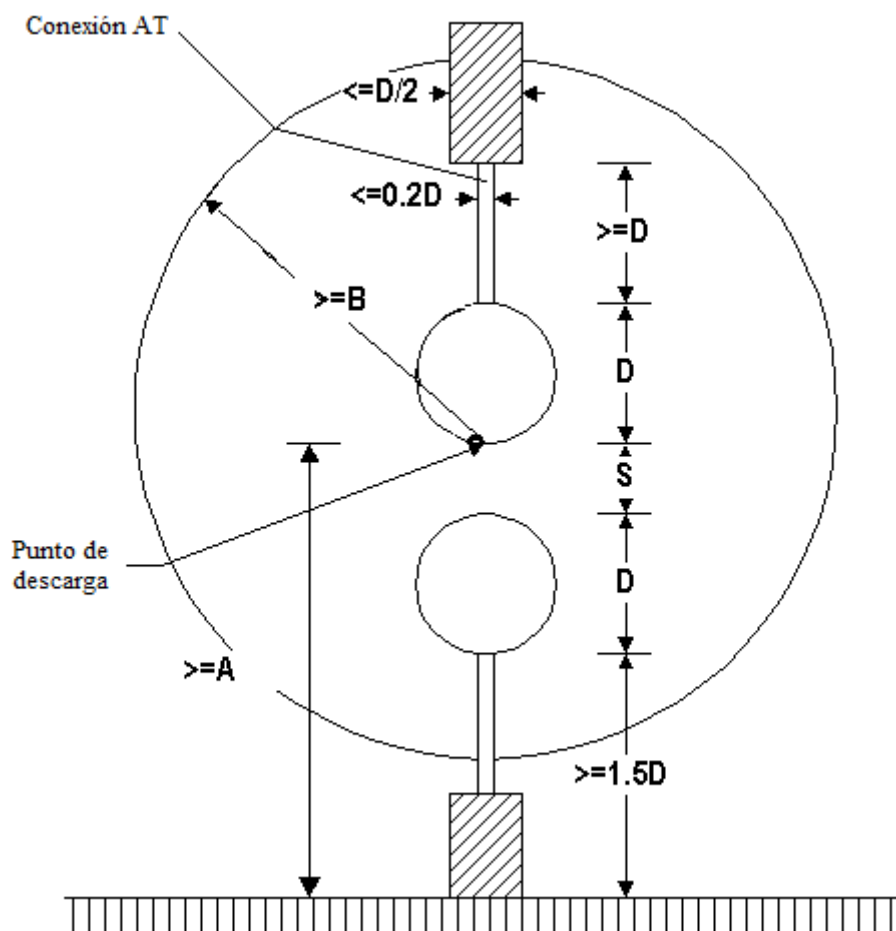


Figura 2.1: Esquema de explosor de esferas.[3]

Donde D es el diámetro de las esferas, S la separación entre ellas, A la distancia desde el punto de descarga hasta el plano de tierra y B el espacio libre de estructuras externas.

Una vez conocidos los elementos básicos que constituyen un explosor de esferas, hay que destacar que el elemento más importante y delicado en su fabricación son las esferas. El diámetro de las esferas está normalizado según estándares internacionales para diferentes niveles de tensión aplicados, y éste no puede diferir en

más de un 2% de su valor nominal. La superficie de las esferas ha de ser lisa y su curvatura ha de ser lo más uniforme posible, ya que la presencia de rugosidades o cambios en la curvatura pueden provocar el efecto corona. Para ello se puede hacer uso de instrumentos como un esferómetro. Durante los ensayos la superficie de las esferas ha de estar limpia y seca ya que estos factores pueden provocar rupturas dieléctricas prematuras.

Dentro de las esferas el punto más delicado y al que hay que prestar mayor atención y mantenimiento es el denominado “punto de descarga”. Este punto está dentro de una región definida por un círculo dibujado sobre las esferas con centro en el punto inferior del electrodo superior y radio $0,3 \cdot D$. La superficie de esta región ha de estar totalmente libre de irregularidades ya que podrían producir descargas o efecto corona antes de la ruptura dieléctrica.



Figura 2.2: Explosor de esferas. [15].

Los explosores de esferas son muy utilizados en los laboratorios de alta tensión debido a su sencillez y exactitud para sus dos aplicaciones fundamentales: voltímetros de cresta y circuitos generadores de impulsos, los cuales serán explicados a continuación. El funcionamiento de los explosores de esferas se basa fundamentalmente en la ruptura dieléctrica del gas que los rodea, aire generalmente.

2.1 Ruptura dieléctrica de un gas

La rigidez dieléctrica o campo de ruptura de un material dieléctrico es el campo eléctrico máximo que puede soportar sin que se produzca ruptura de éste.

Hay dos mecanismos de ruptura de gases, el mecanismo Twonsend el cuál se produce en gases a baja presión (1-10 mbar) en grandes distancias o en pequeñas cavidades en aislamientos sólidos y el mecanismo Streamer o “serpentina” el cuál se produce para distancias superiores a 1 cm a presión atmosférica o algunos milímetros en aire comprimido ($P \cdot d \geq 5 \text{ bar} \cdot \text{mm}$).

Cuando un aislamiento gaseoso está sometido a un campo eléctrico muy por debajo del campo de ruptura, la densidad de carga libre existente (consecuencia de radiaciones naturales UV, X...) se recombina con iones positivos, lo que produce un equilibrio de cargas libres. Al aumentar la tensión, los electrones se aceleran y la intensidad aumenta llegando a saturarse por la falta de cargas libres generadas de manera natural. Con valores cercanos a tensión de ruptura la aceleración de los electrones es tan alta que debido a las colisiones se producen ionizaciones de moléculas neutras, lo que provoca un gran aumento de la corriente que atraviesa el dieléctrico, este fenómeno se denomina ionización primaria. Cerca de la tensión disruptiva se produce la ionización secundaria, bombardeo de iones en el cátodo liberando más electrones, emisiones fotónicas que generan más electrones, los cuales se suman a los anteriores.

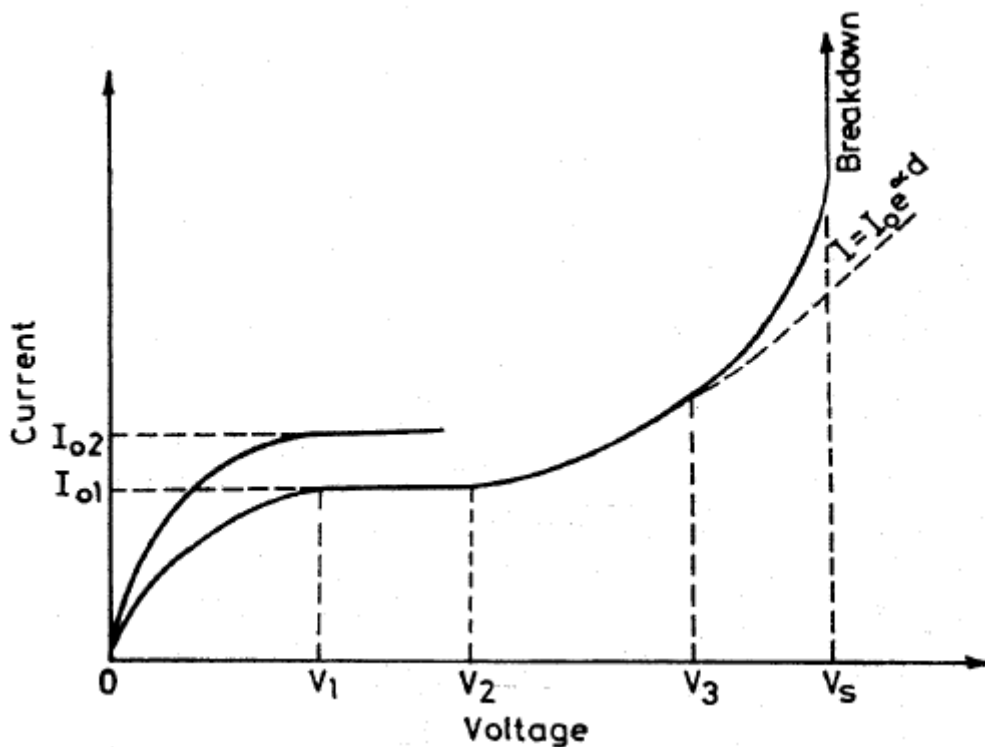


Figura 2.3: Corriente de un gas frente a tensión aplicada. [Kuffel, E., 2000]

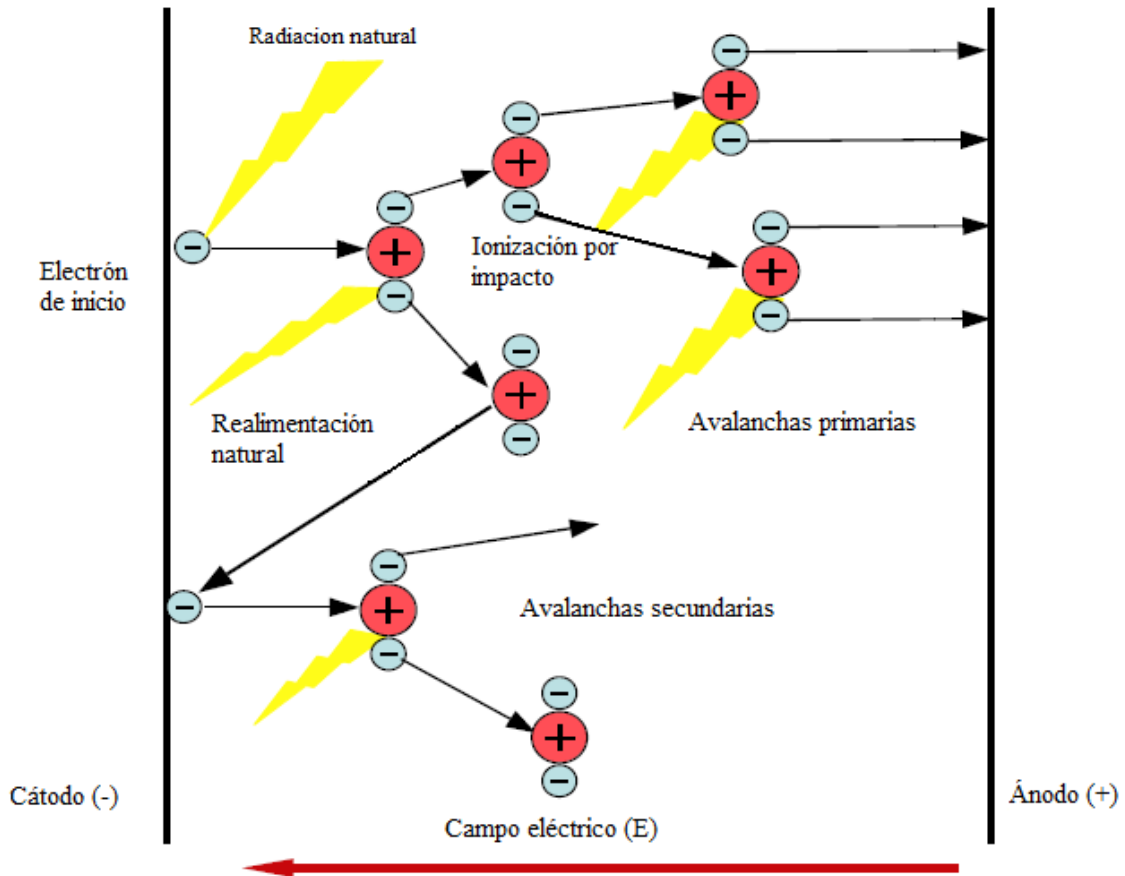


Figura 2.4: Mecanismo de ionización. [5]

Las condiciones iniciales del sistema son los electrones debidos a las fuentes de radiación natural, los cuales debidos a la presencia de un campo eléctrico de gran magnitud (E) dan lugar a ionización por impacto y creando electrones que dejan atrás iones positivos. El proceso de avalancha electrónica implica que a una cierta distancia “x” del cátodo, se produce un incremento en el número de electrones “n”:

$$\frac{dn}{dx} = n \cdot \alpha \quad (2.1)$$

Donde α es el primer coeficiente de ionización de Townsend, siendo el número de colisiones ionizantes por unidad de longitud del camino recorrido por la partícula. El coeficiente crece según sea mayor la energía de cada electrón (W), determinada por:

$$W/e = E \cdot \lambda \quad (2.2)$$

Donde λ es el promedio de distancia recorrida entre colisiones o el recorrido libre medio de electrones, el cual depende de la presión P del gas, que lo modifica en dos sentidos opuestos ([Kuffel, E., 2000]).

- λ es inversamente proporcional a la presión del gas P, ya que si los electrones chocan con mucha frecuencia se aceleran poco, por tanto si aumenta la presión P el coeficiente α decrece.

- Si la presión P aumenta se incrementa el número de colisiones, incrementándose la probabilidad de ionizar el gas, por lo que si P aumenta el coeficiente α crece.

Esto es debido a que existen dos intervalos de presión en los que es menos probable que se produzca ionización, existiendo una presión óptima para que se produzca este fenómeno.

La ionización por impacto no puede ser por sí solo el mecanismo que produzca la ruptura, por lo que tienen que aparecer mecanismos secundarios. Algunos electrones son captados por moléculas electronegativas, modelándose con el coeficiente β , por lo que hay que sustituir el coeficiente α por $\alpha' = (\alpha - \beta)$. Los valores empíricos de estos coeficientes se muestran en tablas en función de la presión del gas, el campo eléctrico aplicado y el gas.

Por otra parte la ionización secundaria debida al bombardeo de iones en el cátodo, un mayor número de colisiones, aún que a menor de velocidad, y emisiones fotónicas generan más electrones. Aparece así el coeficiente secundario de ionización secundaria de Townsend, γ , definido como el número medio de electrones secundarios producidos por el cátodo debido a colisiones ionizantes en el espacio entre electrodos. Los valores empíricos del coeficiente γ dependen del material de los electrodos y del gas entre ellos.

Existe un valor del coeficiente α' para el cual a una distancia determinada entre electrodos “ d ” se produce la descarga disruptiva. A partir de los coeficientes de ionización se obtiene la denominada Ley de Paschen ([Kuffel, E., 2000]), con cual se muestra que la tensión de ruptura dieléctrica es función única de la distancia entre electrodos y la presión del gas que los rodea.

$$U_b = \frac{B \cdot (P \cdot d)}{\ln\left(\frac{A \cdot P \cdot d}{K}\right)} \quad (2.3)$$

Donde:

$U_b \rightarrow$ Tensión de ruptura dieléctrica.

$p \rightarrow$ Presión del gas.

$d \rightarrow$ Distancia de separación entre electrodos.

Los valores de las constantes A y B se muestran a continuación:

<i>Gas</i>	<i>A</i> <i>ion pairs</i> $\text{cm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$	<i>B</i> V cm^{-1} Torr^{-1}	<i>E/p range</i> $\text{V cm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$	<i>V_i</i> <i>volts</i>
H ₂	5	130	150–600	15.4
N ₂	12	342	100–600	15.5
air	15	365	100–800	–
CO ₂	20	466	500–1000	12.6
He	3	34	20–150	24.5
Hg	20	370	200–600	–

Tabla 2.1: Valores de las constantes A y B para distintos gases y rangos de E/p.
(T=20 °C).[Kuffel, E., 2000]

Y el valor de la constante $K = \ln(1 + \frac{1}{\gamma})$, que depende directamente del coeficiente de ionización secundaria Townsend, el cual depende del material de los electrodos.

Una vez que se ha iniciado la ionización y si la corriente sigue aumentando, la tensión cae, se genera una luz blanca y un gran calentamiento del cátodo, produciéndose así el arco eléctrico debido a la ionización por colisiones de moléculas.

La ley de Paschen no implica que la tensión de ruptura se incremente linealmente con el producto “ $p \cdot d$ ”, aunque experimentalmente se ha obtenido que es casi lineal en algunas regiones. En la siguiente figura se muestra la relación entre la tensión de ruptura dieléctrica y el producto “ $p \cdot d$ ”.

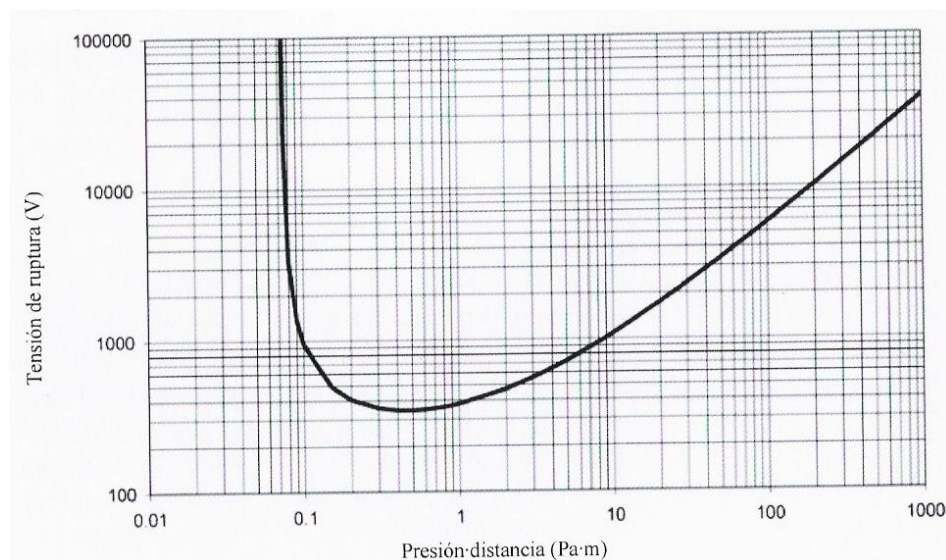


Figura 2.5: Curva de Paschen.[3].

Como se puede observar la tensión de ruptura pasa por un valor mínimo definido por los valores ($U_{b \min}, p \cdot d_{\min}$)

La tensión de ruptura dieléctrica para campos uniformes en aire para un gran rango de valores del producto de presión y distancia entre explosores se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$\bar{\alpha} \cdot d = Ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = k \quad (2.4)$$

Donde:

$\bar{\alpha} \rightarrow$ Coeficiente de ionización efectiva.

$\gamma \rightarrow$ Coeficiente de ionización secundaria.

A partir de esta ecuación, Schumann demostró que para valores limitados de E/p y α/p (empleando presiones atmosféricas convencionales) se puede aproximar por:

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = C \cdot \left[\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^2 \quad (2.5)$$

Donde C es una constante, E y E_c son magnitudes de campo, E_c el valor límite de E en el cual se inicia la ionización efectiva y p la presión del gas.

Dividiendo la ecuación 2.4 entre el producto “ $p \cdot d$ ” y combinado con la ecuación 2.5 se obtiene:

$$\frac{k}{p \cdot d} = C \cdot \left[\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^2 \quad (2.6)$$

Reordenando:

$$\frac{E}{p} = \left(\frac{E}{p} \right)_c + \sqrt{\frac{k/C}{p \cdot d}} \quad (2.7)$$

Se obtiene la expresión para la tensión de ruptura dieléctrica:

$$U_b = \left(\frac{E}{p} \right)_c \cdot p \cdot d + \sqrt{\frac{k}{C}} \cdot \sqrt{p \cdot d} \quad (2.8)$$

Y sustituyendo en la ecuación 2.6 los valores de las constantes determinados por Sohst y Schröder para campos homogéneos ([Kuffel, E., 2000]):

$$p = 1 \text{ bar}$$

$$E_c = 24,36 \text{ kV/cm}$$

$$k/C = 45,16 \text{ (kV)}^2/\text{cm}$$

Se obtiene la denominada como Ecuación de Shumann:

$$U_b = 6,72 \cdot \sqrt{p \cdot d} + 24,36 \cdot p \cdot d \text{ kV} \quad (2.9)$$

Con la ecuación de Shumann (ecuación 2.7) es posible determinar la tensión de ruptura para campos homogéneos en aire para un rango de valores para el producto “ $p \cdot d$ ” de $10^{-2} < p \cdot d < 5 \cdot 10^2$ ($bar \cdot cm$). También cabe destacar que las condiciones atmosféricas como humedad relativa, altitud, temperatura, presencia de partículas de polvo o contaminación en el aire o sobre los electrodos pueden afectar a la rigidez dieléctrica.

2.2 Aplicaciones del explosor de esferas

2.2.1. Voltímetros de cresta

La medición de tensiones en alta tensión es una tarea compleja ya que aparte de los problemas típicos de metrología que pueden afectar a la precisión de una medida (tolerancia, temperatura...), los equipos de medida pueden estar sometidos a distintos efectos relacionados con los sistemas de alta tensión, los cuales pueden provocar el fallo del dispositivo y de esta manera obtener medidas erróneas.

Los dispositivos de medida empleados para mediciones rutinarias son más precisos y fáciles de manejar pero en ocasiones no tienen el suficiente alcance y contienen circuitos electrónicos frecuentemente sensibles a los efectos electromagnéticos pudiendo ser alterados y llegar a producirse fallos durante medida, por lo que no es recomendable el uso de este tipo de dispositivos si se quiere obtener una medida precisa.

A parte de los problemas ya citados, hay que tener en cuenta otros problemas que pueden aparecer, entre los cuales, debido a que los circuitos y equipos de alta tensión suelen tener grandes volúmenes, a la hora de la medición pueden aparecer capacidades parásitas entre elementos y tierra, las cuales pueden afectar severamente a las medidas. Además, los dispositivos no solo tienen que estar preparados para soportar alta tensión en condiciones normales si no que en ocasiones han de soportar corrientes de cortocircuitos transitorias.

Por lo tanto y debido a que la utilización de dispositivos de medida tradicionales, como divisores capacitivos, divisores capacitivos o transformadores reductores, se pueden producir grandes errores en las medidas, este tipo de dispositivos no son recomendamos para este uso. Para solucionar este problema y poder realizar medidas con gran exactitud se recurre a los entrehierros, dos electrodos separados por gas a una cierta distancia. En la actualidad se emplean fundamentalmente dos tipos de dispositivos para este fin, los explosores de esferas y los denominados “barra-barra”. Éstos últimos consisten en dos barras enfrentadas como se muestra en la figura 2.6. Este método de medida es menos utilizado por ser bastante laborioso a pesar de tener una mayor precisión en las medidas.

Generalmente se emplean como elemento de protección en ensayos de alta tensión, al igual que los explosores de esferas, para evitar tensiones por encima de los niveles críticos de los equipos. También se emplean como elementos de medida pudiendo aplicar rangos de tensión hasta 1300 kV, aún que estos voltímetros tienen la

limitación de medir únicamente tensiones de cresta en corriente alterna. Como el campo es homogéneo entre las dos barras, la rigidez dieléctrica no se ve afectada por la forma de onda.

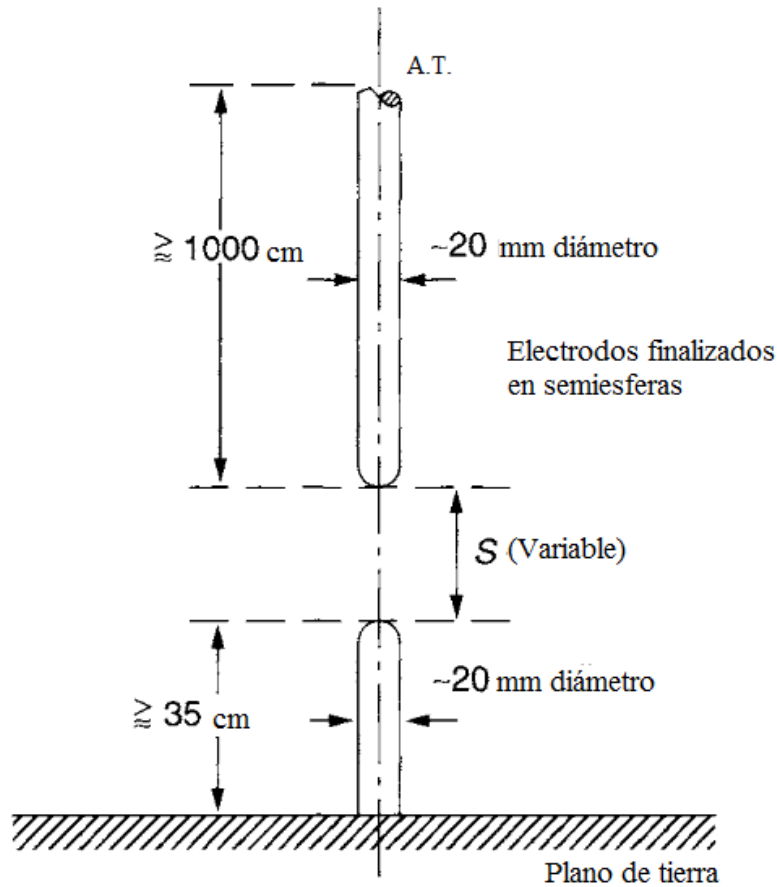


Figura 2.6: Disposición típica de electrodos en “barra-barra” para medidas en alta tensión. [Kuffel, E., 2000]

Por otro lado los explosores de esferas por su elevada exactitud, seguridad y sencillez de diseño son los entrehierros más utilizados en los laboratorios de alta tensión y es probable que nunca desaparezcan de éstos. A continuación se va a explicar la aplicación de los explosores de esferas para la medición de tensiones en alta tensión.

Para poder explicar el funcionamiento de los explosores de esferas para este propósito hay que partir de dos conceptos fundamentales: la rigidez dieléctrica del aire y la homogeneidad del campo eléctrico. El campo eléctrico de ruptura dieléctrica del aire para campos homogéneos es una magnitud bien conocida.

Por ello, en primer lugar, ha de asegurarse la homogeneidad del campo eléctrico en el espacio entre las dos esferas, para lo cual, la distancia de separación entre los dos explosores ha de ser muy inferior al radio de éstos [Kuffel, E., 2000]. Una vez se haya asegurado la homogeneidad del campo eléctrico en el entrehierro se puede caracterizar con elevada de precisión la rigidez dieléctrica del aire, tal y como se ha visto en la sección 2.1.

Como antes se ha mencionado, el campo de ruptura dieléctrica del aire para campos homogéneos es bien conocido, típicamente 30 kV/cm en condiciones ambientales normales, por lo que a partir de este dato se puede determinar la tensión que había aplicada en el momento de ruptura en función de la distancia de separación entre los explosores y la presión del gas. Estos valores de tensión de ruptura dieléctrica están recogidos por estándares internacionales para ensayos de alta tensión, en los cuales se muestran dichos valores para un gran rango de diámetros de esferas y distancia entre ellas. El fragmento de tabla mostrada proviene del “IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques” en la que se muestra el rango de valores los cuales han sido empleados para el dimensionado del explosor de esferas.

Sphere gap spacing cm	Sphere diameter cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
2.4		65.5	67.5	69.5	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0			
2.6		(69.0)	72.0	74.5	75.0	75.5	75.5	75.5	75.5			
2.8		(72.5)	76.0	79.5	80.0	80.5	81.0	81.0	81.0			
3.0		(75.5)	79.5	84.0	85.0	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0		
3.5		(82.5)	(87.5)	95.0	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0	99.0		
4.0		(88.5)	(95.0)	105	108	110	112	112	112	112		
4.5			(101)	115	119	122	125	125	125	125		
5.0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138	
5.5				(131)	138	143	149	151	151	151	151	
6.0				(138)	146	152	161	164	164	164	164	
6.5				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177	
7.0				(150)	(161)	169	184	189	190	190	190	
7.5				(155)	(168)	177	195	202	203	203	203	
8.0					(174)	(185)	206	214	215	215	215	
9.0					(185)	(198)	226	239	240	241	241	
10					(195)	(209)	244	263	265	266	266	266
11						(219)	261	286	290	292	292	292
12						(229)	275	309	315	318	318	318
13							(289)	331	339	342	342	342
14							(302)	353	363	366	366	366
15							(314)	373	387	390	390	390
16							(326)	392	410	414	414	414
17							(337)	411	432	438	438	438
18							(347)	429	453	462	462	462
19							(357)	445	473	486	486	486
20							(366)	460	492	510	510	510
22								489	530	555	560	560
24								515	565	595	610	610
26								(540)	600	635	655	660
28								(565)	635	675	700	705

Tabla 2.2.- Valores pico de tensiones en descargas disruptivas ($V_{50\%}$ valores de prueba de impulso) en kV para tensión alterna a frecuencia de red, tipo rayo e impulsos tipo maniobra. [IEEE std 4TM, 2013].

2.2.2 Circuitos de generación de transitorios

Otra de las aplicaciones de los explosores de esferas es integrarlos en circuitos de alta tensión para la generación de transitorios en alta tensión, los cuales son usados en los laboratorios para simular los efectos que pueden causar éstos en los sistemas aislantes de los equipos de alta tensión sometidos a transitorios de tensión normalizados. Los dos impulsos empleados en los ensayos son el impulso tipo rayo y el impulso tipo maniobra.

El impulso tipo rayo es empleado para simular los efectos causados por la caída de un rayo atmosférico en alguna de las fases a lo largo de una línea eléctrica o en el exterior de una subestación eléctrica. Las amplitudes de tensión de este tipo de rayos pueden llegar a ser del orden de 1000 kV o mayores, produciendo corrientes de 100 kA o incluso superiores en las líneas de transporte.

El otro, es producido por maniobras en las líneas y sus amplitudes dependen de la tensión de operación mientras que su forma de onda tanto de las impedancias del sistema como de las condiciones de maniobra. En este caso la transmisión de las ondas es más lenta que en el impulso tipo rayo pero pueden ser muy dañinas para los sistemas aislantes [Kuffel, E., 2000].

Para realizar este tipo de ensayos y así poder simular sus efectos, se emplean impulsos normalizados que difieren principalmente en el tiempo de duración. El impulso normalizado tipo rayo tiene un tiempo de frente $T_1 = 1,2 \mu s$ y un tiempo de cola $T_2 = 50 \mu s$ con una tolerancia inferior a $\pm 30\%$ y $\pm 20\%$ respectivamente, mientras que el impulso normalizado tipo maniobra tiene un tiempo de frente $T_p = 250 \mu s$ y un tiempo de cola $T_2 = 2500 \mu s$.

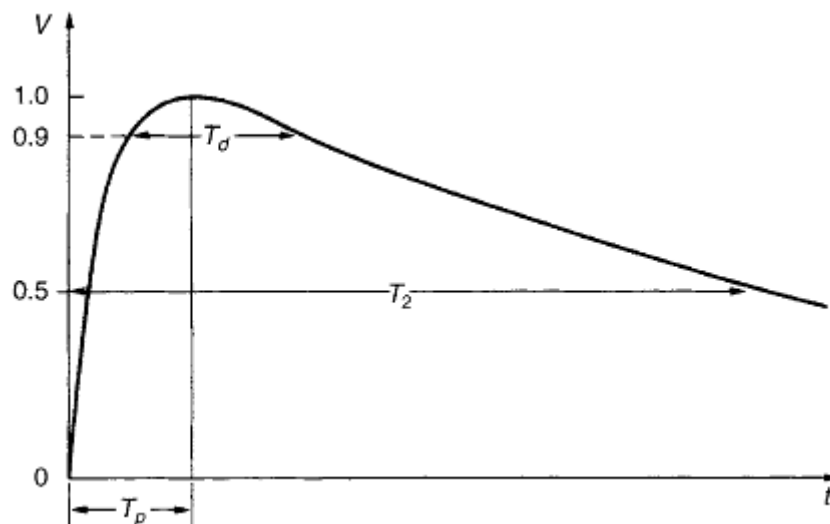


Figura 2.7: Impulso tipo maniobra normalizado. T_p : Tiempo de frente, T_2 : Tiempo de cola y T_d : Tiempo por encima del 90% de tensión. [Kuffel, E., 2000].

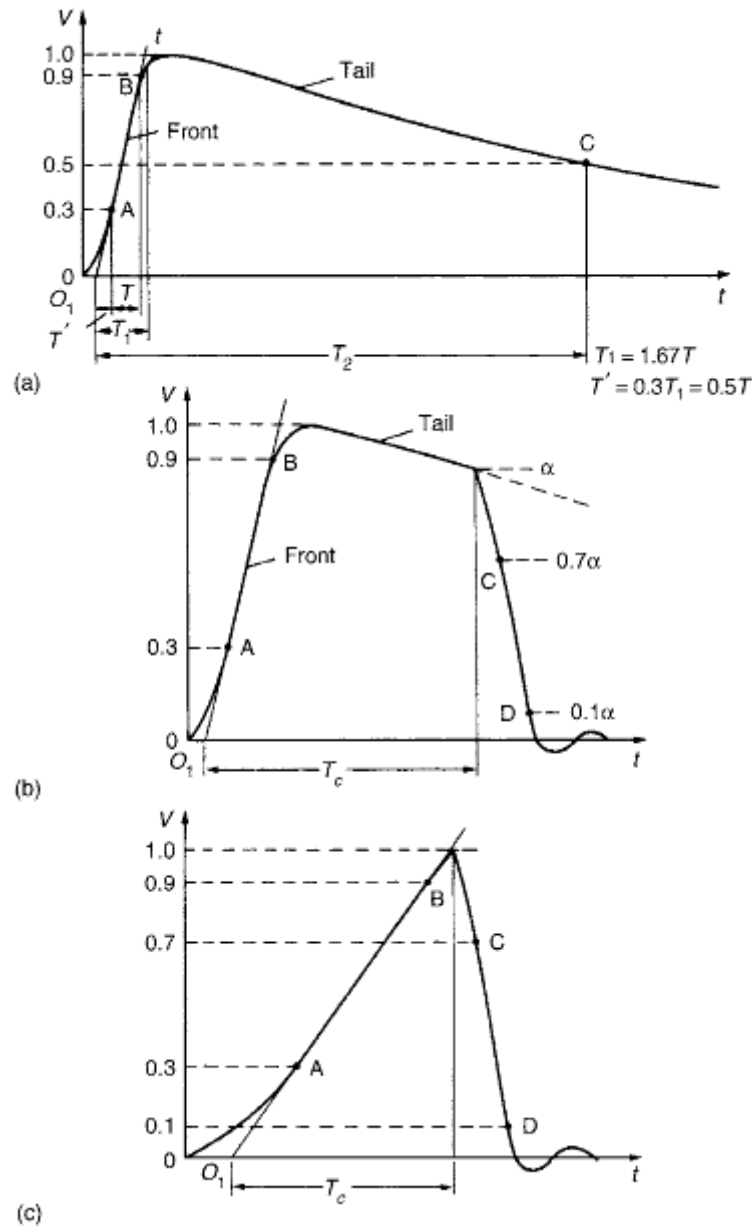


Figura 2.8: Forma de impulso tipo rayo normalizado. a) impulso tipo rayo completo, b) impulso tipo rayo cortado en la cola, c) impulso tipo rayo cortado en el frente. T_1 : Tiempo de frente, T_2 : Tiempo de cola, T_c : Tiempo de corte y O_1 : eje virtual. [Kuffel, E., 2000].

Para la generación de este tipo de impulsos se emplean circuitos de generación de transitorios en los cuales se incluyen los explosores de esferas. Hay dos tipos de circuitos de generación de transitorios, los circuitos mono-etapa y los circuitos multi-etapa que a continuación se procede a explicar.

2.2.2.1 Circuitos de generación de transitorios mono-etapa

A continuación se muestran los circuitos mono-etapa más empleados para la generación de impulsos en los cuales se emplean los explosores de esferas a modo de interruptor y para limitar la tensión aplicada.

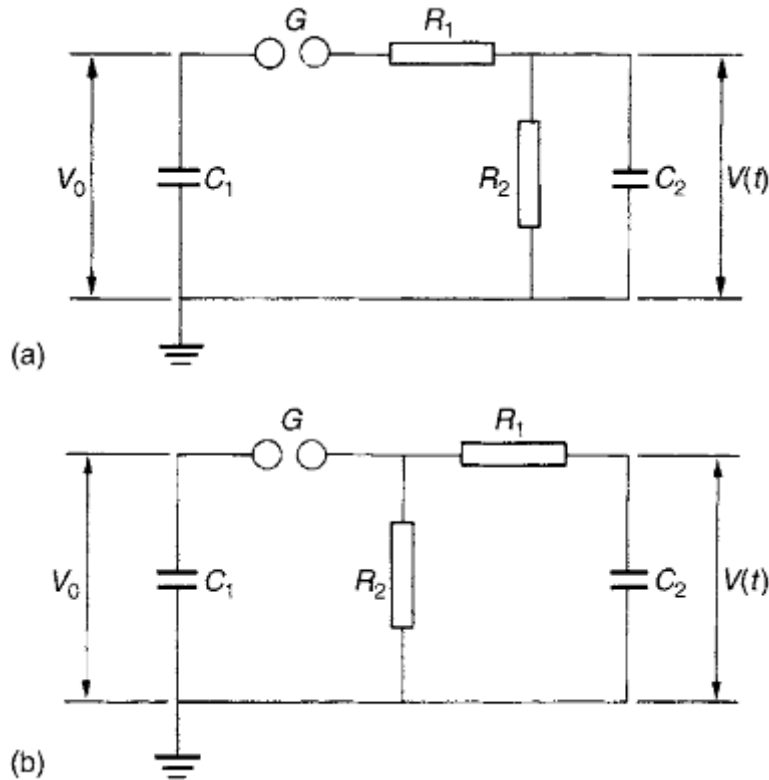


Figura 2.9: Circuitos de generación de impulsos. C_1 : condensador de descarga; C_2 : condensador de carga; R_1 : resistencia de amortiguación; R_2 : resistencia de descarga; G : distancia entre esferas. [Kuffel, E., 2000].

El funcionamiento de los circuitos de generación de impulsos es el siguiente: el condensador C_1 se va cargando hasta que se produce ruptura dieléctrica en el aire existente entre las dos esferas. Debido a que la tensión de ruptura dieléctrica del aire en función de la separación entre esferas para campos homogéneos es conocida con precisión (ver capítulo 2.1), se emplean esferas con distancia regulable para así determinar la tensión de cresta del transitorio. Es un sistema muy utilizado como interruptor en los ensayos de los laboratorios de alta tensión y puede emplearse para generar impulsos desde algunos kV hasta 1 MV, pero a partir de 200 kV-250kV para asegurar la homogeneidad del campo es necesario un diámetro de esferas muy grande, por lo que es muy costoso económicamente.

El resto de elementos del circuito, R_1 , R_2 y C_2 , son los que dan la forma de onda al impulso. La resistencia R_1 amortigua el circuito y controla el tiempo de frente T_1 , la resistencia R_2 descarga los condensadores para así controlar la cola y el condensador C_2 representa la capacidad de la carga incluyendo capacidades parásitas, como pueden ser dispositivos de medida o cargas capacitivas adicionales. Por otro lado, las inductancias parásitas (de cables de conexión largos, por ejemplo) en los circuitos de generación mono-etapa no son consideradas, al contrario que en los circuitos de generación multi-etapa.

El parámetro más significativo de los generadores de impulsos es la máxima energía que puede almacenar el circuito alimentado por corriente continua.

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot (V_{0\max})^2 \quad (2.10)$$

Donde:

$W \rightarrow$ Energía almacenada por el sistema.

$C_1 \rightarrow$ Capacidad del condensador.

$V_{0\max} \rightarrow$ Tensión máxima aplicada.

Como el condensador C_1 siempre es mucho más grande que el condensador C_2 ($C_1 \gg C_2$) es éste el que determina en gran medida el coste económico del generador de impulsos.

Para el análisis del circuito es necesario usar la transformada de Laplace de los circuitos mostrados en la figura 2.9.

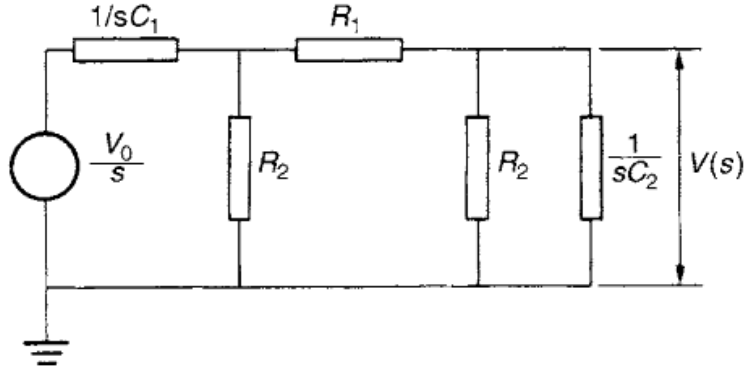


Figura 2.10. Circuito de transformada de Laplace. [Kuffel, E., 2000].

En la figura 2.10 se muestra la transformada de Laplace, donde se simulan las condiciones límite: para $t \leq 0$ s el condensador C_1 está cargado con V_0 y para $t > 0$ s el condensador C_1 está conectado directamente al resto de la red. La tensión en la carga para el circuito de la figura 3 a) está dada por:

$$V(s) = \frac{V_0}{s} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.2)$$

Donde, para el circuito de la figura 3a:

$$Z_1 = \frac{1}{C_1 \cdot s} + R_1 \quad (2.3)$$

$$Z_2 = \frac{(R_2/C_2) \cdot s}{R_2 + 1/C_2 \cdot s} \quad (2.4)$$

Y sustituyendo se obtiene:

$$V(s) = \frac{V_0}{k} \cdot \frac{1}{s^2 + a \cdot s + b} \quad (2.5)$$

Donde:

$$a = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} + \frac{1}{R_1 \cdot C_2} + \frac{1}{R_2 \cdot C_2} \quad (2.6)$$

$$b = \frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2} \quad (2.7)$$

$$k = R_1 \cdot C_2 \quad (2.8)$$

Para el circuito de la figura 2.9 b) y aplicando la formula general (ecuación 2.5) se obtiene un resultado final similar, cambiando únicamente el parámetro a, siendo b y k iguales a los calculados anteriormente.

$$a = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} + \frac{1}{R_1 \cdot C_2} + \frac{1}{R_2 \cdot C_1} \quad (2.9)$$

En ambos circuitos la tensión en el dominio del tiempo está dada por la ecuación:

$$V(t) = \frac{V_0}{k} \cdot \frac{e^{-\alpha_1 \cdot t} - e^{-\alpha_2 \cdot t}}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (2.10)$$

Donde α_1 y α_2 son las raíces de la ecuación $s^2 + as + b = 0$, siendo:

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b} \quad (2.11)$$

Por tanto, la tensión de salida $V(t)$ es la superposición de dos funciones exponenciales de signos opuestos. La raíz negativa produce una mayor constante de tiempo, $1/\alpha_1$, que la raíz positiva, $1/\alpha_2$. En la siguiente figura (figura 2.11) se muestra una representación gráfica de la ecuación 2.10, que, haciendo una comparación con las figuras 2.7 y 2.8, indica la posibilidad de generar con este tipo de circuitos tanto el impulso tipo rayo como el impulso tipo maniobra.

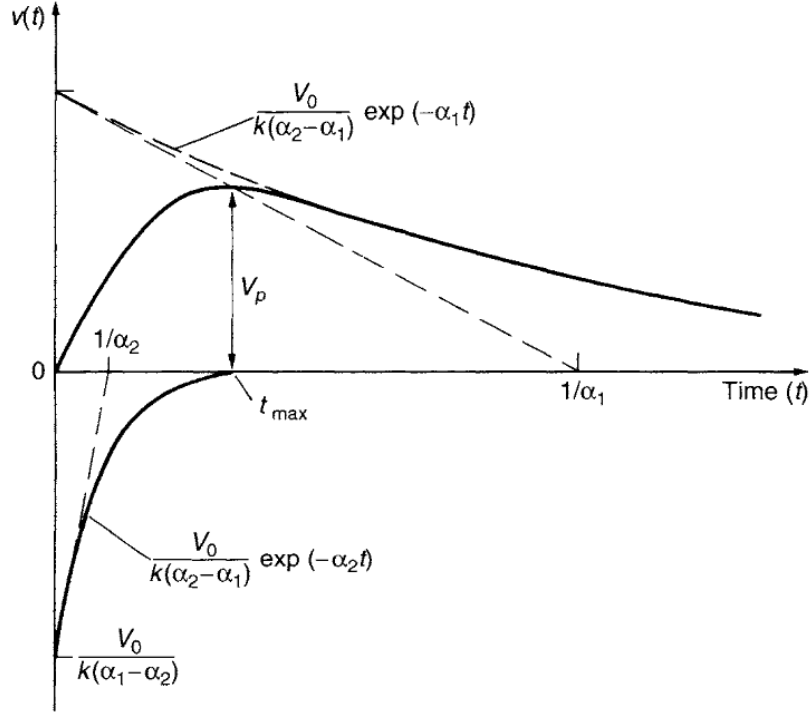


Figura 2.11: Onda de tensión del impulso y sus componentes según los circuitos mostrados en la figura 2.9.[Kuffel, E., 2000].

Los dos circuitos mostrados en la figura 2.9 son equivalentes siendo la única diferencia entre ellos la eficiencia (η):

$$\eta = \frac{V_p}{V_0} \quad (2.12)$$

Obteniendo una eficiencia para el circuito de la figura 2.9 b) igual a:

$$\eta = \frac{C_1}{(C_1 + C_2)} = \frac{1}{1 + (C_2/C_1)} \quad (2.13)$$

La eficiencia del circuito aumentará cuando la relación (C_2/C_1) decrezca hasta cero. En esta ecuación también se muestra el por qué el condensador C_1 ha de ser mucho mayor que la carga C_2 .

Para el circuito de la figura 2.9 a) se obtiene una eficiencia:

$$\eta \cong \frac{C_1}{(C_1 + C_2)} \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} = \frac{1}{(1 + C_2/C_1)} \frac{1}{(1 + R_1/R_2)} \quad (2.20)$$

En este caso la eficiencia del circuito no solo depende de la relación entre condensadores (C_2/C_1) si no que también depende de la relación entre las resistencias (R_1/R_2). A continuación se muestra la dependencia de la eficiencia de ambos circuitos en función de la relación entre condensadores (C_2/C_1) para un impulso tipo rayo (1.2/50 μ seg) aunque se puede aplicar para otro tipo de formas de onda.

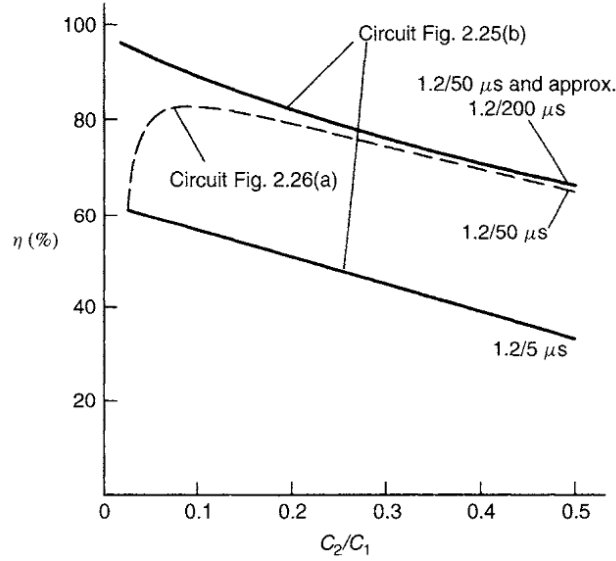


Figura 2.12: Eficiencia (η) de ambos circuitos en función de la relación entre condensadores C_2/C_1 para impulsos tipo rayo T_1/T_2 . [Kuffel, E., 2000].

Respecto al dimensionado de los elementos de los circuitos (R_1, R_2, C_1 y C_2), en general C_1 y C_2 son conocidos previamente para elegir una buena eficiencia del circuito. Respecto a las resistencias R_1 y R_2 es necesario determinarlas teniendo en cuenta que son éstas las que establecen los tiempos de frente y de cola. Para el circuito de la figura 3a valen:

$$R_1 = \frac{1}{2C_1} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot C_2}} \right] \quad (2.21)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot C_2}} \right] \quad (2.22)$$

Y para el circuito de la figura 3b:

$$R_1 = \frac{1}{2C_2} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot C_2}} \right] \quad (2.23)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot C_2}} \right] \quad (2.24)$$

En las ecuaciones anteriores es necesario conocer las constantes de tiempo $1/\alpha_1$ y $1/\alpha_2$, las cuales dependen de la forma de onda y de las constantes de tiempo T_1, T_2 y T_p representadas en las figuras 1 y 2. En la tabla siguiente se muestran los valores de dichas constantes para distintas formas de onda normalizadas.

T_1/T_2 (μs)	T_p/T_2 (μs)	$1/\alpha_1$ (μs)	$1/\alpha_2$ (μs)
1.2/5	-	3,48	0,80
1.2/50	-	68,2	0,405
1.2/200	-	284	0,381
250/2500	-	2877	104
-	250/2500	3155	62,5

Tabla 2.3: Valores de las constantes de tiempo $1/\alpha_1$ y $1/\alpha_2$ para distintos impulsos normalizados. [Kuffel, E., 2000].

Una vez concluido el dimensionado del circuito es importante tener en cuenta la posible aparición de oscilaciones superpuestas a los transitorios de tensión debido a las inductancias parásitas (L) en cables y otros elementos. Estas oscilaciones son admisibles cuando no superan el 5% de los valores de cresta y el 25% cuando aparecen en el frente de onda.

El circuito empleado en el laboratorio de AT (LINEALT) para la generación de impulsos tipo rayo para llevar a cabo uno de los ensayos sobre el explosor de esferas, era un circuito de generación de impulsos mono-etapa con los siguientes valores de resistencias y condensadores.

- Resistencia de frente: $R_1 = 0,3 \text{ k}\Omega$
- Resistencia de cola: $R_2 = 6,2 \text{ k}\Omega$
- Condensador de carga: $C_1 = 10 \text{ nF}$
- Condensador de descarga: $C_2 = 1 \text{ nF}$

2.2.2.2 Circuitos de generación de transitorios multi-etapa

Para la generación de impulsos de muy alta tensión utilizando circuitos mono-etapa pueden surgir varios problemas como la dificultad de utilizar los explosores de esferas como interruptores en muy alta tensión, el gran tamaño de los elementos que componen el circuito, el gran esfuerzo necesario para cargar el condensador C_1 a altas tensiones y la dificultad para evitar el efecto corona en todos los elementos del circuito. Por todo ello, la utilización de circuitos de generación de transitorios mono-etapa para este propósito no es recomendable.

Marx, en 1923, para evitar todos estos problemas sugirió cargar condensadores en paralelo a través de resistencias de alto valor óhmico y descargarlos a través de los explosores de esferas. Fueron los primeros circuitos de generación de transitorios multi-etapa, muy similares a los usados en la actualidad.

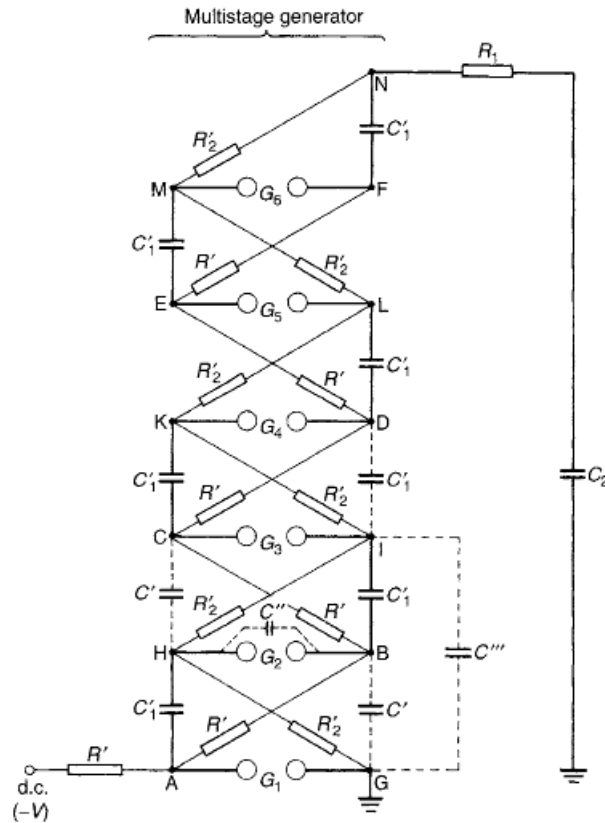


Figura 2.13: Circuito generador de impulsos básico de seis etapas (generador de Marx). [Kuffel, E., 2000].

Los condensadores C'_1 son cargados a través de las resistencias de alto valor óhmico R' y se descargan a través de las resistencias R'_2 mucho menores que las primeras. Después de un periodo de carga cercano a 1 minuto los puntos A, B, C, D, E y F están a la tensión de la fuente (DC), por ejemplo $-V$, respecto a los puntos G, H, I, J, K, L y N que están a potencial de tierra y la caída de tensión en las resistencias R'_2 durante la carga son despreciables.

La descarga se inicia en el explosor de esferas con menor distancia de separación, G_1 . Cuando esto ocurre el potencial del punto A cambia de $-V$ a cero y el potencial del punto H pasa de cero a $+V$. Como el punto B está a potencial $-V$, en el explosor de esferas G_2 aparece una tensión $2V$, lo que causa la ruptura dieléctrica incrementando en el punto I la tensión en $+2V$, lo que provoca una diferencia de potencial en el espacio de aire G_3 de $3V$, provocando la ruptura dieléctrica quedando el punto C a potencial cero y así sucesivamente hasta que se produzca un transitorio de valor de cresta de valor nV , siendo n el número de etapas que tenga el circuito.

La distancia entre esferas en el primer explosor de esferas (G_1) se regula de tal manera que la tensión de ruptura dieléctrica para esa distancia (U_b) sea mayor que la tensión de carga ($U_b > V$). El disparo en G_1 puede producirse de manera electrónica o aplicando radiación ultravioleta. En los explosores sucesivos la distancia entre esferas (G_2, G_3, \dots, G_n) es cada vez mayor para así asegurar un disparo progresivo.

En la práctica el funcionamiento está ligeramente modificado por las capacidades parásitas que aparecen a lo largo del circuito C' , C'' y C''' . Las capacidades parásitas C' se forman debido a los campos eléctricos entre las etapas adyacentes, C'' tienen una formación similar entre dos etapas y C''' son debidas a los explosores de esferas. Teniendo en cuenta las capacidades parásitas, en el punto B el incremento de potencial será de:

$$V_B = -V + V \cdot \left(\frac{C''}{C' + C'' + C'''} \right) = -V \cdot \left(\frac{C' + C'''}{C' + C'' + C'''} \right) \quad (2.27)$$

Por lo que la diferencia de potencial a través del espacio entre esferas G_2 es:

$$V_{G2} = +V - (V_B) = V \cdot \left(1 + \frac{C' + C'''}{C' + C'' + C'''} \right) \quad (2.28)$$

En la figura 2.12 la resistencia que controla el frente de la onda (R_1) se encuentra entre el generador y la carga, como una resistencia externa por lo que tiene que soportar durante muy poco tiempo toda la tensión y por lo tanto puede ocupar mucho espacio. Esta desventaja se puede subsanar si parte de esta resistencia o toda ella es distribuida por el generador. En la figura 2.13, en la cual también se han incluido los condensadores en serie C'_1 y los huecos entre esferas (diseño original de Goodlet) se ha cambiado a un equivalente en el cual la polaridad de la tensión de salida es la misma que la tensión de carga.

Las resistencias de carga R' son mayores que las resistencias distribuidas R'_1 y R'_2 . Añadir resistencias de amortiguación externas R''_1 permite a amortiguar las oscilaciones debidas a las inductancias y capacidades de elementos externos entre el generador y la carga.

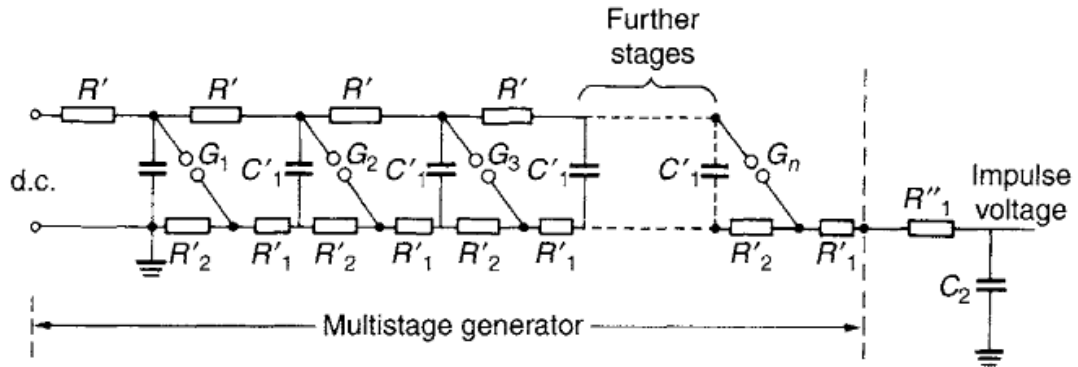


Figura 2.14: Generador de impulsos multi-etapa con descargas distribuidas y resistencias de frente. R'_2 : Resistencias de descargas; R'_1 : Resistencias internas de amortiguación; R''_1 : Resistencias externas de amortiguación. [Kuffel, E., 2000]

El generador multi-etapa mostrado en la figura 2.13 puede ser reducido a un circuito generador de impulsos mono-etapa como el representado en la figura 2.9, siendo la capacidad total del circuito (C_1), la resistencia efectiva de amortiguación (R_1) y la resistencia de descarga (R_2), despreciando las resistencias de carga R' :

$$\frac{1}{C_1} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_1'} \quad (2.29)$$

$$R_1 = R_1'' + \sum_{i=1}^n R_1' \quad (2.30)$$

$$R_2 = n \cdot R_2' = \sum_{i=1}^n R_2' \quad (2.31)$$

Donde “ n ” es el número de etapas.

En todos estos diseños, es claro que el diseño de los explosores es crítico para conseguir conmutaciones a las tensiones esperadas en los ensayos. En caso de error, se pueden aplicar tensiones no esperadas en equipos que pueden sufrir fallos catastróficos en estos ensayos potencialmente destructivos.

3. Dimensionado del explosor de esferas

Durante este capítulo se van a realizar los cálculos necesarios para el dimensionado de todos los elementos que forman el explosor de esferas, cilindros y esferas, así como la distancia máxima entre esferas en función de la tensión aplicada. Por último se propondrá el diseño final tanto del explosor de esferas como de la estructura de soporte, respetando en todo momento las restricciones marcadas por los estándares al respecto.

3.1. Radio de las esferas

En este apartado se pretende calcular el radio de las tres esferas, todas ellas iguales entre sí, que componen el explosor de esferas.

Para ello, se calcula el campo eléctrico producido por la máxima tensión aplicada, 140 kV ([Kuffel, 2000]), en función de la distancia al centro de las esferas.

$$E(r) = \frac{U \cdot R}{r^2} \quad (3.1)$$

Siendo:

$U \rightarrow$ Tensión aplicada.

$R \rightarrow$ Radio de la esfera.

$r \rightarrow$ Distancia del punto en el cual se calcula el campo eléctrico, respecto del centro de la esfera, siendo $r \geq R$.

El campo eléctrico máximo se presenta sobre la superficie de la esfera, es decir $r=R$, por lo que:

$$E_{max} = \frac{U}{R} \quad (3.2)$$

Para evitar el efecto corona, es decir, la ionización del aire cercano a la superficie de las esferas, se calcula dicho radio para que el campo eléctrico máximo, el producido sobre la superficie de éstas, no exceda los $2/3$ del campo de ruptura dieléctrica del aire (típicamente 30 kV/cm en condiciones normales de presión y temperatura).

A continuación, se procede a calcular el radio mínimo de las esferas, el cual permite cumplir las condiciones anteriores. Resolviendo la ecuación 3.2 se obtiene:

$$R = \frac{U}{E_{max}} = \frac{140}{\frac{2}{3} \cdot 30} = 7 \text{ cm}$$

Por lo que el radio de las tres esferas debe cumplir:

$$R \geq 7 \text{ cm}$$

3.2. Radio de los cilindros

A continuación, se calcula el radio del cilindro que une las dos esferas superiores y el cilindro unido a la esfera inferior. Ambos cilindros tienen el mismo radio. El valor de dicho radio ha de estar comprendido entre un valor máximo y uno mínimo. Para determinar ambos valores, al igual que en el caso de las esferas, se calcula dicho radio en función del campo eléctrico sobre la superficie de los cilindros.

En el caso de tener dos cilindros coaxiales de radios r_1 y r_2 , se puede calcular el campo eléctrico en un punto genérico r , siendo $r_1 \leq r \leq r_2$, con:

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.3)$$

De nuevo, el campo eléctrico máximo aparece sobre la superficie de los cilindros, $r = r_1$, por lo que:

$$E_{max} = \frac{U}{r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.4)$$

Para el caso del valor máximo, el campo eléctrico tanto en la superficie de los cilindros como en la de las esferas ha de ser igual, por lo que para calcular el radio máximo de los cilindros (r_{1max}) se igualan sus campos eléctricos máximos, es decir, el campo sobre sus superficies.

Para ello, se recurre a la hipótesis de tener dos esferas concéntricas de radios R_1 y R_2 , con la cual se puede calcular el campo eléctrico en un punto r situado entre ambas esferas, $R_1 \leq r \leq R_2$, con:

$$E(r) = \frac{U}{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (3.5)$$

Tal y como se mencionó anteriormente, el campo eléctrico máximo se presenta en la superficie de la esfera de radio R_1 , por lo que $r = R_1$, resultando:

$$E_{max} = \frac{U}{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} \cdot \frac{1}{(R_1)^2} \quad (3.6)$$

Para calcular el radio de los cilindros (r_1) se igualan los campos eléctricos máximos en las esferas y los cilindros, (3.4) y (3.6):

(3.7)

(3.8)

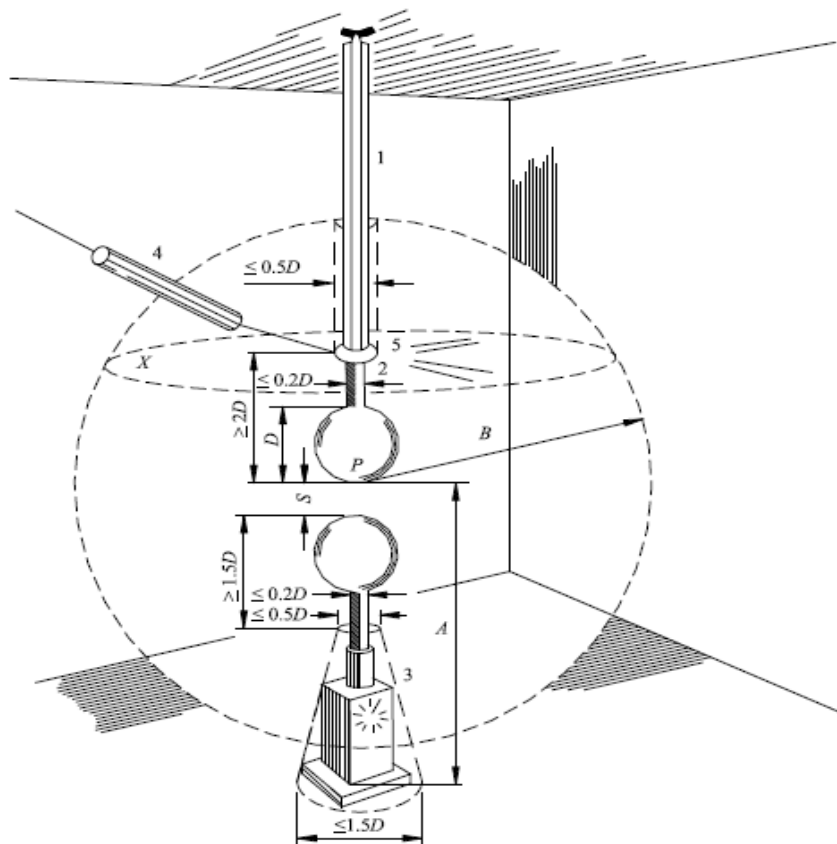


Figura 3.1.- Dimensiones de un explosor de esferas. [IEEE std 4TM, 2013]

Sphere diameter D (cm)	Minimum value of height A	Maximum value of height A	Minimum value of distance B
Up to 6.25	$7 D$	$9 D$	$14 S$
10 to 15	$6 D$	$8 D$	$12 S$
25	$5 D$	$7 D$	$10 S$
50	$4 D$	$6 D$	$8 S$
75	$4 D$	$6 D$	$8 S$
100	$3.5 D$	$5 D$	$7 S$
150	$3 D$	$4 D$	$6 S$
200	$3 D$	$4 D$	$6 S$

Tabla 3.1.- Dimensiones de un explosor de esferas. [IEEE std 4TM, 2013].

Asumiendo que dichas medidas se cumplen (como se verá posteriormente en el dimensionado del explosor y la estructura de sujeción de éste), para la obtención del radio de los cilindros (r_1), se puede asumir como cierto que los radios tanto exteriores de la esfera (R_2) como del cilindro (r_2) son mucho mayores que los interiores respectivamente.

Para ello se hace referencia a la distancia desde el electrodo superior al plano de tierra, distancia A , la cual se representa en la figura 1.1; en la tabla 1.1 se da el rango de valores que puede tomar dicha distancia. Como se puede observar el valor de A es proporcional al valor del diámetro de las esferas que previamente se ha calculado.

Se toma el valor máximo para A , es decir, $A = 8 \cdot D$, siendo D el radio de las esferas, 14 cm , por lo que $A = 8 \cdot 14 = 112 \text{ cm}$. Por tanto, para la resolución de la ecuación 3.8 se puede tomar como cierto la siguiente relación entre radios, la cual cumple lo anteriormente explicado:

$$R_2 \gg 8 \cdot R_1 \quad (3.9)$$

$$r_2 \gg 8 \cdot r_1 \quad (3.10)$$

Esta distancia, se puede tomar como el radio de la esfera imaginaria exterior de tierra, por lo que relacionando el radio interior y el exterior se obtiene una relación entre radios $R_2/R_1 = 16$, sucediendo lo mismo para el radio de los cilindros.

Sustituyendo en la ecuación 3.8, se obtiene:

$$\frac{R_1}{r_1} \geq \frac{\ln \frac{8 \cdot r_1}{R_1}}{1 - \frac{R_1}{8 \cdot R_1}} = \frac{\ln(8)}{1 - \frac{1}{8}} \quad (3.11)$$

$$\frac{R_1}{r_1} \geq 2,377 \quad (3.12)$$

Por lo que el radio del cilindro máximo es:

$$r_{1\max} = \frac{R_1}{2,377} \quad (3.13)$$

Para obtener el radio mínimo, hay que tener en cuenta que éste no puede ser cualquier valor, ya que para un radio muy pequeño, se podría producir la ionización del aire debido a un campo eléctrico elevado en su superficie, produciendo el efecto corona a lo largo del cilindro, por lo cual, para este cálculo al igual que para el cálculo del radio de las esferas, se impone que el campo eléctrico sobre la superficie de los cilindros no exceda los 2/3 del campo eléctrico de ruptura dieléctrica del aire.

A partir de este dato, se calcula el radio con el que se verifica lo anterior, ($r_{1\min}$). Despejando de la ecuación 3.4 el radio mínimo resulta:

$$r_{1\min} = \frac{U}{E_{\max} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.14)$$

De nuevo, se toma la tensión máxima de la fuente y se toma la relación entre radios anteriormente explicada, es decir, $r_2 = 16 \cdot r_1$ de manera que $r_2 \gg 8 \cdot r_1$.

$$r_{1\min} = \frac{U}{E_{\max} \cdot \ln \frac{16 \cdot r_1}{r_1}} = \frac{140}{20 \cdot \ln(16)} \quad (3.15)$$

$$r_{1\min} = 2,53 \text{ cm}$$

Una vez calculados ambos radios, ya se conocen los límites entre los cuales estará el radio de los cilindros (r_1), el cual se determinará una vez se elija el diámetro final de las esferas:

$$2,53 \leq r_1 \leq \frac{R_1}{2,377} \text{ en cm} \quad (3.16)$$

3.3. Distancia entre esferas

Para determinar la distancia entre esferas, se tiene que tener en cuenta la distancia máxima entre ellas para la cual puede haber disrupción eléctrica cumpliendo la condición de campo uniforme. Para ello, se utiliza nuevamente la máxima tensión del laboratorio.

Para cumplir la condición de campo uniforme, la separación entre las esferas debe ser muy inferior al radio de éstas. En la figura 3.2 se muestra cómo evoluciona el campo eléctrico entre dos esferas en función de su separación (S) y radio (R). Se puede

observar cómo para un cociente separación-radio menor a uno, ($S/R < 1$), el campo eléctrico en la superficie de las esferas no supera más de un 36% el medio, por lo que no solo es conveniente que ésta distancia sea inferior al radio, sino que tiene que ser muy inferior ya que ese incremento del 36% tampoco es admisible para considerar campo uniforme.

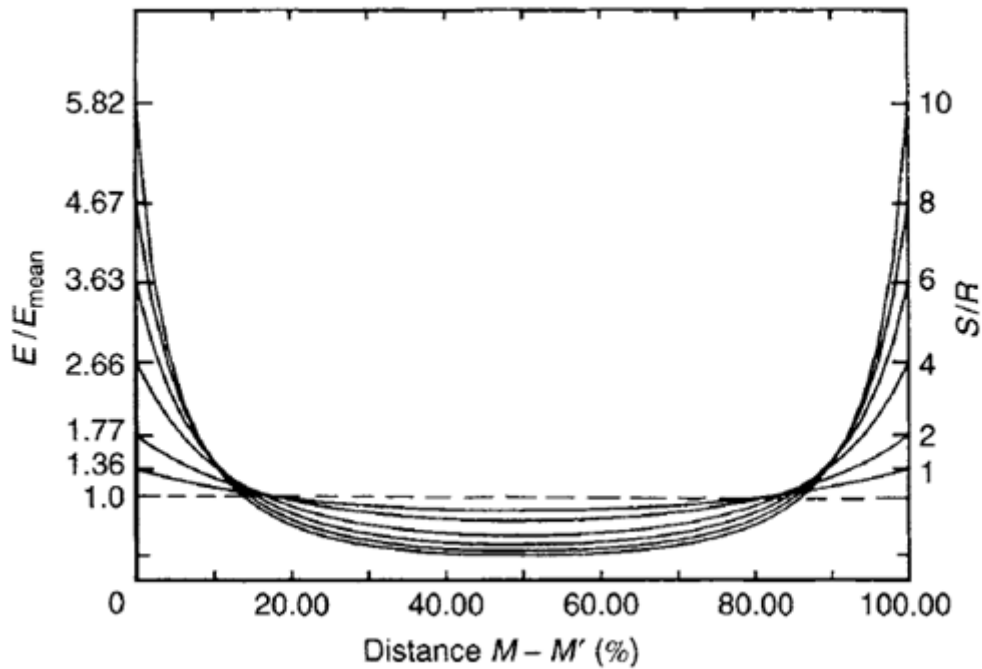


Figura 3.2.- Distribución del campo eléctrico a lo largo del eje $M-M'$ de esfera a esfera para varios valores de la relación S/R . [Kuffel, E., 2000].

Para establecer la distancia de separación máxima, la norma *IEEE* aporta una serie de tablas en las que se recoge la tensión máxima aplicada en función del radio de las esferas y la separación entre éstas. A continuación se muestra el fragmento de tabla obtenida del estándar *IEEE* (tabla 3.2) el cual se va a utilizar para la selección de dicha distancia:

Sphere gap spacing cm	Sphere diameter cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
2.4		65.5	67.5	69.5	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0			
2.6		(69.0)	72.0	74.5	75.0	75.5	75.5	75.5	75.5			
2.8		(72.5)	76.0	79.5	80.0	80.5	81.0	81.0	81.0			
3.0		(75.5)	79.5	84.0	85.0	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0		
3.5		(82.5)	(87.5)	95.0	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0	99.0		
4.0		(88.5)	(95.0)	105	108	110	112	112	112	112		
4.5			(101)	115	119	122	125	125	125	125		
5.0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138	
5.5				(131)	138	143	149	151	151	151	151	
6.0				(138)	146	152	161	164	164	164	164	
6.5				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177	
7.0				(150)	(161)	169	184	189	190	190	190	
7.5				(155)	(168)	177	195	202	203	203	203	
8.0					(174)	(185)	206	214	215	215	215	
9.0					(185)	(198)	226	239	240	241	241	
10					(195)	(209)	244	263	265	266	266	266
11						(219)	261	286	290	292	292	292
12						(229)	275	309	315	318	318	318
13							(289)	331	339	342	342	342
14							(302)	353	363	366	366	366
15							(314)	373	387	390	390	390
16							(326)	392	410	414	414	414
17							(337)	411	432	438	438	438
18							(347)	429	453	462	462	462
19							(357)	445	473	486	486	486
20							(366)	460	492	510	510	510
22								489	530	555	560	560
24								515	565	595	610	610
26								(540)	600	635	655	660
28								(565)	635	675	700	705

Tabla 3.2.- Valores pico de tensiones en descargas disruptivas ($V_{50\%}$ valores de prueba de impulso) en kV para tensión alterna a frecuencia de red, tipo rayo e impulsos tipo maniobra. [IEEE std 4TM, 2013]

En la tabla se destacan con valores entre paréntesis la incertidumbre del fenómeno de disrupción por la no uniformidad del campo eléctrico, debido a que el espacio entre las esferas es muy cercano al valor del radio o incluso superior a éste.

Los datos están tomados en condiciones atmosféricas estándar:

- Temperatura: 20 °C
- Presión: 101,3 kPa

Y unas condiciones de humedad absoluta entre 5 g/m³ y 12 g/m³ con una media de 8,5 g/m³. Se puede apreciar que para esferas de los diámetros como los

calculados (12.5-15cm), la disrupción se produce con distancias entre ellas de entre 5 y 6 cm.

Por otra parte, se puede calcular la distancia para ruptura dieléctrica del aire a 140 kV con campo eléctrico uniforme a través de la ecuación de Schumman ([Kuffel, 2000]):

$$U_b = 24,36 \cdot P \cdot S + 6,72 \cdot \sqrt{P \cdot S} \quad (3.17)$$

Donde:

$U_b \rightarrow$ Tensión aplicada [kV].

$P \rightarrow$ Presión en bares. Se toma el valor de la presión atmosférica (1,013 bar).

$S \rightarrow$ Distancia entre esferas [cm].

Sustituyendo los datos en la ecuación 3.17 se obtiene una separación máxima entre esferas:

$$140 = 24,36 \cdot 1,013 \cdot S + 6,72 \cdot \sqrt{1,013 \cdot S} \quad (3.18)$$

$$S = 5,057$$

Por lo que la distancia máxima entre esferas es:

$$S = 5,057 \text{ cm}$$

Por tanto, tanto los valores de la tabla 3.2 como la aplicación de la fórmula coinciden en indicar que 140 kV de campo uniforme, producen ruptura dieléctrica del aire para una separación entre esferas de 5 a 6 cm, que serán tomados como la distancia máxima a que estarán los explosores. El campo uniforme se garantizará mediante los valores de R_1 y r_1 .

Cabe destacar que para estos valores de separación entre esferas, el parámetro B de la figura 1.1 debe tener valores mínimos de hasta 72cm. Esto quiere decir que el cociente $R_2/R_1=10.3$, cumple las condiciones para 3.11 y 3.15 alterando muy poco el resultado final:

$$2 \leq r_1 \leq \frac{R_1}{2,6} \text{ en cm} \quad (3.19)$$

3.4. Diseño eléctrico

3.4.1. Propuesta de diseño eléctrico inicial

Una vez confirmada esta distancia de disrupción para la máxima tensión del laboratorio, se reajustan los cálculos para los valores normalizados del estándar IEEE

más cercanos a los 2x7cm de diámetro de las esferas. Para ello, se hace uso de la tabla 3.2, en la cual se representan los distintos diámetros de esfera normalizados, eligiendo un diámetro de 15 cm.

Una vez fijado el radio de las esferas ($R_1 = 7,5 \text{ cm}$), se define el radio de ambos cilindros, el cual ha de estar entre los valores límite calculados anteriormente en función del radio de las esferas, por lo que sustituyendo en 3.16, resulta:

$$2,53 \leq r_1 \leq 3,16 \text{ cm} \quad (3.20)$$

Como se puede comprobar en la figura 3.1, el estándar IEEE recomienda que el diámetro de los cilindros ha de ser inferior a $0,2 \cdot D$ ($r_1 = 0,2 \cdot R_1 = 1,5 \text{ cm}$). Este valor es inadmisibles, ya que con ese radio, el campo sobre la superficie de dichos cilindros superaría el campo de ruptura dieléctrica del aire. Para comprobarlo, se procede a calcular, a partir de la ecuación 3.3, el campo eléctrico sobre la superficie de los cilindros en el caso de tomar el valor máximo que aconseja el estándar ($r_1 = 1,5 \text{ cm}$).

$$E(r_1) = \frac{U}{r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{140}{1,5 \cdot \ln(16)} = 33,66 \text{ kV/cm}$$

Como se puede comprobar, incluso tomando el valor límite el campo es superior al de ruptura dieléctrica del aire, por lo que como el valor del radio ha de ser inferior a éste según el estándar, el valor del campo sería todavía mayor, lo cual provocaría a lo largo del cilindro la ionización del aire apareciendo el efecto corona. Como esto es totalmente inadmisibles, de ahí que se haya calculado el límite inferior para evitar este problema.

Finalmente se elige un radio de los cilindros igual a 3 cm, el cual está dentro de los límites. A través de la ecuación 3.4 se comprueba que el campo en la superficie es igual a $16,83 \text{ kV/cm}$. También se comprueba el campo eléctrico en la superficie de las esferas con el nuevo radio asignado (7.5 cm) con la ecuación 3.2 obteniendo $18,67 \text{ kV/cm}$. Por tanto, en ninguno de los dos casos hay peligro de ionización del aire.

Por último, y haciendo uso de la tabla 3.2, se determina la distancia máxima entre esferas. Para ello, se tiene en cuenta el diámetro de las esferas, 15 cm, y la tensión máxima a aplicar, 140 kV. Para estos valores, corresponde una separación máxima de 5,5 cm.

Por tanto, las medidas de los elementos principales del explosor de esferas son:

- Radio de las esferas: $R_1 = 7,5 \text{ cm}$
- Radio de los cilindros: $r_1 = 3 \text{ cm}$
- Separación máxima entre esferas: $S = 5,5 \text{ cm}$

3.4.2. Propuesta de diseño eléctrico final

Debido al alto precio del aluminio y la imposibilidad de costear los gastos de fabricación de las esferas y cilindros, se ha tenido que reducir el tamaño de éstas. Para seleccionar el diámetro normalizado que más se ajusta al presupuesto disponible, se utiliza la tabla 2, de la cual se selecciona un diámetro para las esferas de 10 cm. En cualquier caso, en el diseño no está claro que otros elementos comerciales del circuito de ensayos estén exentos de descargas parciales para 140kV, por lo que reducir la tensión máxima de partida es razonable.

De la tabla 3.2 se puede obtener la tensión máxima, 123 kV (nueva tensión máxima del explosor de esferas diseñado), para esas esferas y la separación máxima entre esferas que no afecta a la homogeneidad del campo, 5 cm.

En primer lugar se calcula el campo sobre la superficie de las esferas, para lo que se utiliza la ecuación 3.6. Para la resolución, se toma como radio de la esfera imaginaria exterior de tierra la distancia A de la figura 3.1 y tabla 3.1, resultando en este caso $A = 8 \cdot D = 8 \cdot 10 = 80 \text{ cm}$, por lo que $R_2 = 80 \text{ cm}$.

$$E_{max} = \frac{U}{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} \cdot \frac{1}{(R_1)^2} = \frac{123}{\left(\frac{1}{5} - \frac{1}{80}\right) \cdot 5^2} = 26,24 \text{ kV/cm}$$

Como se puede comprobar, el campo sobre la superficie de las esferas es inferior al campo de ruptura dieléctrica del aire en condiciones normales ambientales, 30 kV/cm, por lo que no se produce el efecto corona.

Para determinar el radio de los cilindros, al igual que en la primera aproximación, éste debe estar comprendido entre el valor máximo y mínimo, los cuales se calculan a continuación.

El procedimiento para calcular el radio máximo es igualar los campos eléctricos sobre la superficie de las esferas y de los cilindros con la ecuación 3.7 que se resolverá posteriormente a través de la ecuación 3.8.

Antes de resolver la ecuación 3.8, se hace referencia de nuevo a la figura 3.1 y tabla 3.1 en las cuales se muestran las dimensiones del explosor de esferas. Se puede asumir como cierto que los radios exteriores tanto de las esferas (R_2) como de los cilindros (r_2) son mucho mayores que los interiores respectivamente como se muestra a continuación. Para ello, de nuevo, se hace referencia a la distancia desde el electrodo superior al plano de tierra, distancia $A = 8 \cdot D$, siendo D el diámetro de las esferas anteriormente elegido, ya que esta distancia sería el radio de la esfera imaginaria exterior de tierra, por lo que $A = 8 \cdot 10 = 80 \text{ cm}$, y relacionando este radio con el interior se obtiene una relación entre radios $R_2/R_1 = 16$, sucediendo lo mismo para el radio de los cilindros.

Por tanto, para la resolución de la ecuación 3.8, se pueden dar por válidas las siguientes desigualdades:

$$R_2 \gg 8 \cdot R_1 \quad (3.21)$$

$$r_2 \gg 8 \cdot r_1 \quad (3.22)$$

Y sustituyendo en la ecuación 3.8:

$$\frac{R_1}{r_1} \geq \frac{\ln \frac{8 \cdot r_1}{r_1}}{1 - \frac{R_1}{8 \cdot R_1}} = \frac{\ln(8)}{1 - \frac{1}{8}} = 2,37$$

Por lo que el radio máximo de los cilindros es:

$$r_{1 \max} = \frac{R_1}{2,37} = \frac{5}{2,37} = 2,11 \text{ cm}$$

Para determinar el radio mínimo, se emplea la ecuación 3.14. Para evitar el efecto corona a lo largo de la superficie de los cilindros, el campo eléctrico sobre la superficie de éstos no puede superar el campo de ruptura dieléctrica del aire, 30 kV/cm , por lo que para realizar este cálculo se impone que dicho campo se da sobre la superficie de éstos.

Al igual que en el cálculo del radio máximo, se asume que el radio exterior es mucho mayor que el radio interior. Haciendo referencia a la explicación anterior, se puede considerar que $r_2 = 16 \cdot r_1$, obteniendo:

$$r_{1 \min} = \frac{U}{E_{\max} \cdot \ln \frac{12 \cdot r_1}{r_1}} = \frac{123}{30 \cdot \ln(16)} = 1,48 \text{ cm}$$

De esta manera, el radio de los cilindros queda delimitado entre los valores:

$$1,48 \leq r_1 \leq 2,11 \text{ cm} \quad (3.22)$$

Finalmente se elige el radio de los cilindros igual a 1,8 cm. A partir de la ecuación 3.4 se comprueba que el campo eléctrico sobre su superficie es igual a $24,65 \text{ kV/cm}$, por lo que no se supera el campo de ruptura dieléctrica del aire, evitando así la aparición del efecto corona hasta los 123 kV de diseño.

Una vez fijado el radio de los cilindros, se muestran a continuación las medidas de los principales elementos del explosor de esferas:

- Radio de las esferas: $R_1 = 5 \text{ cm}$
- Radio de los cilindros: $r_1 = 1,8 \text{ cm}$
- Separación máxima entre esferas: $S = 5 \text{ cm}$

3.5. Modelado de la estructura de soporte

El explosor se compone de dos esferas en la parte superior unidas entre ellas por un cilindro (electrodo superior y parte en tensión), y de una esfera unida a un cilindro y éste a su vez conectado a tierra en la parte inferior (electrodo inferior). La primera aproximación al diseño se muestra a continuación (Figura 3.3), la cual no se pudo llevar a cabo ya que a la hora de la fabricación surgieron varios problemas que a continuación se explicarán.

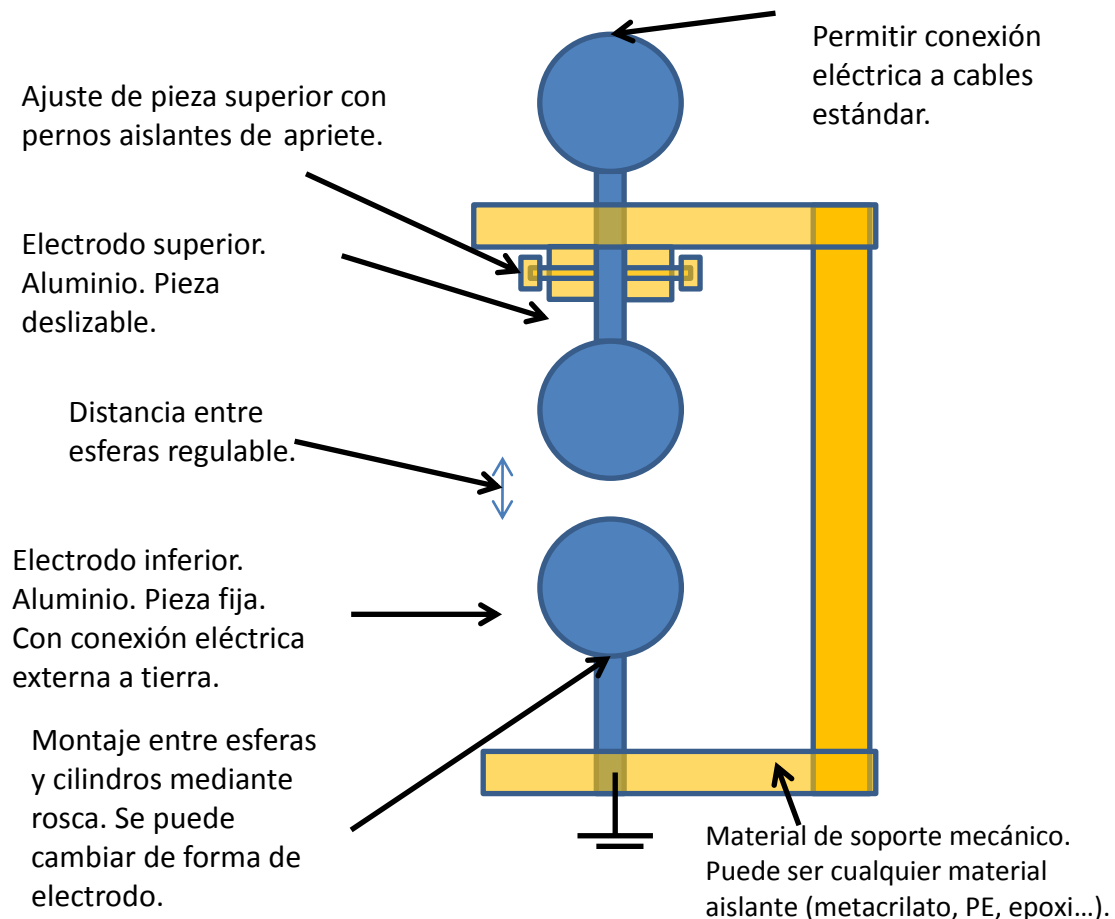


Figura 3.3. Primera propuesta de diseño.[Elaboración propia].

Como se muestra en la figura 3.3, en el primer diseño la pieza móvil para variar la distancia entre esferas era el electrodo superior, compuesto por las dos esferas unidas por el cilindro. Para regular esta distancia, se utilizaría un sistema de ajuste con pernos aislantes, ya que al estar el electrodo superior en tensión no sería posible utilizar elementos metálicos (como tornillos, tuercas...) ya que podrían provocar el efecto corona. Por otro lado, debido al gran peso del conjunto de ambas esferas, fabricado en aluminio, este sistema de sujeción no era viable.

Otro de los problemas surgidos hace referencia a la estructura de soporte. En un primer lugar se pensó fabricarlo de metacrilato o algún material aislante similar. De nuevo el problema surgió por el peso del conjunto superior, ya que se necesitaba un

gran espesor del soporte superior para que fuera capaz soportar el peso o bien la estructura podría ceder, por lo que resultaba necesario tanto cambiar de material para la estructura como realizar otro diseño.

Debido a los inconvenientes citados fue necesario cambiar de diseño, el cual se muestra en la figura 3.4, donde los problemas surgidos en el primer diseño se solventaban.

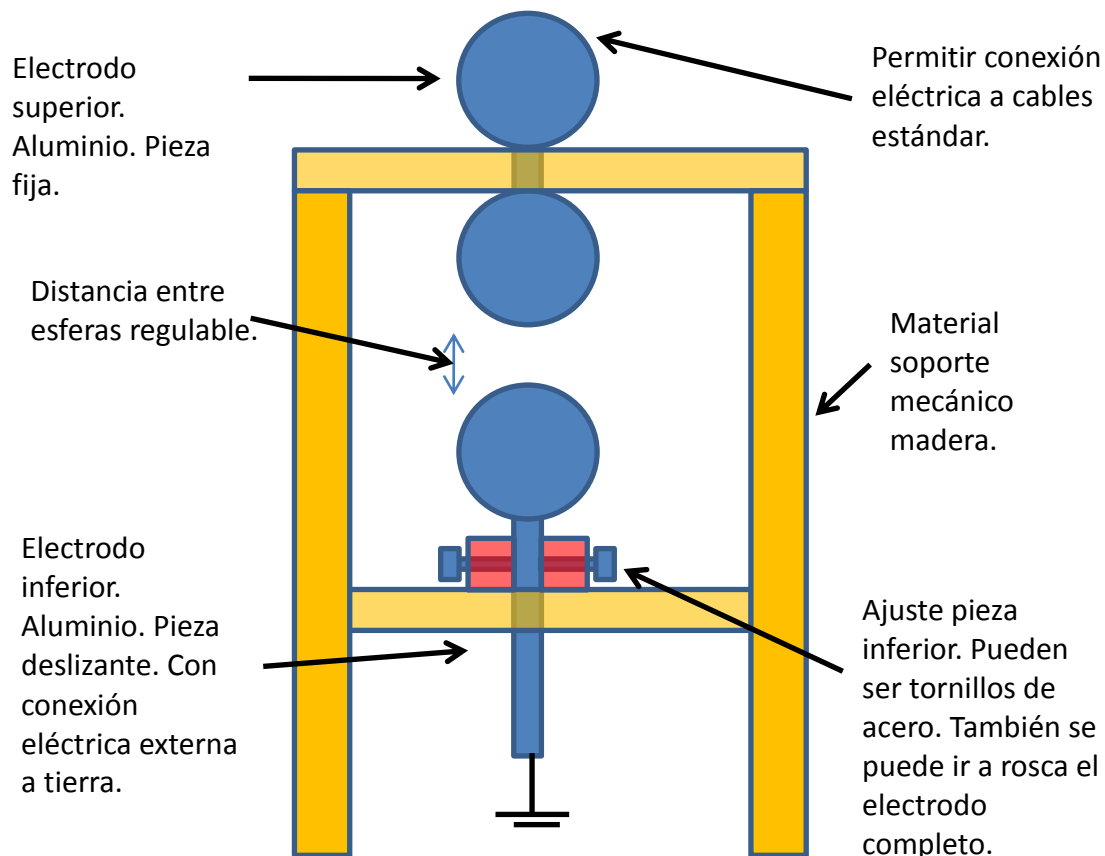


Figura 3.4.- Propuesta final de diseño. [Elaboración propia].

En este caso se cambió el material de la estructura, madera, material también aislante pero de mayor consistencia (e incluso menor precio) que el material pensado en la primera aproximación del diseño, metacrilato, por lo que se podrá reducir el grosor de la estructura. También se ha modificado el diseño de la estructura, colocando cuatro columnas, dándole una mayor consistencia, por lo que no habrá problemas para soportar el peso de las esferas.

Otro de los cambios fundamentales fue que el electrodo superior fuera la parte fija, evitando así el problema de ajuste y sujeción debido a su gran peso. Para ello, en este diseño, el electrodo móvil es el inferior, de menor peso. En el ajuste para regular la distancia entre esferas se pueden utilizar elementos metálicos, ya que en este caso al encontrarse este electrodo conectado a tierra (0 V) no hay peligro de que se produzca el efecto corona al utilizar tornillos de acero u otro material metálico, mejorando sustancialmente la consistencia del ajuste.

3.6. Dimensionado del explosor de esferas y su estructura

Una vez seleccionado el diseño definitivo, se procede a acotar las medidas del explosor de esferas y su estructura. A continuación se muestran dos figuras, en la primera de ellas la separación entre esferas es nula (figura 3.5) mientras que en la segunda la distancia entre esferas es la máxima admisible (figura 3.6).

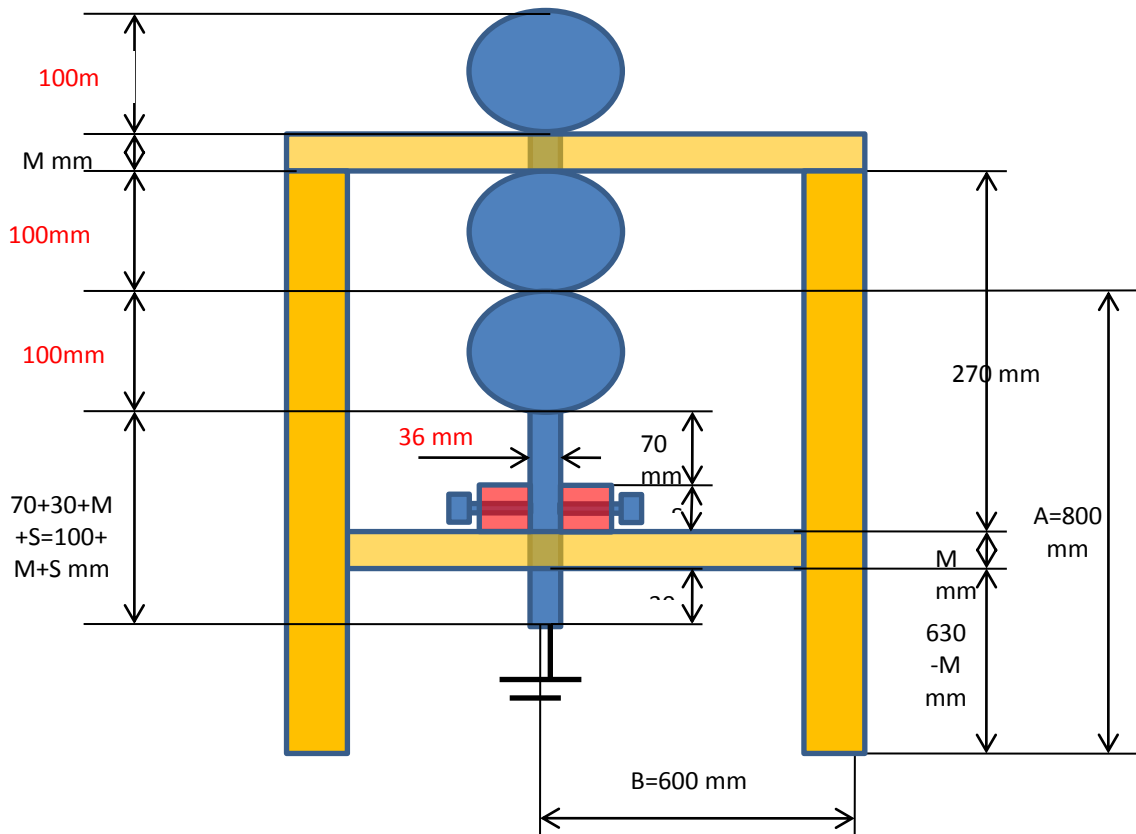
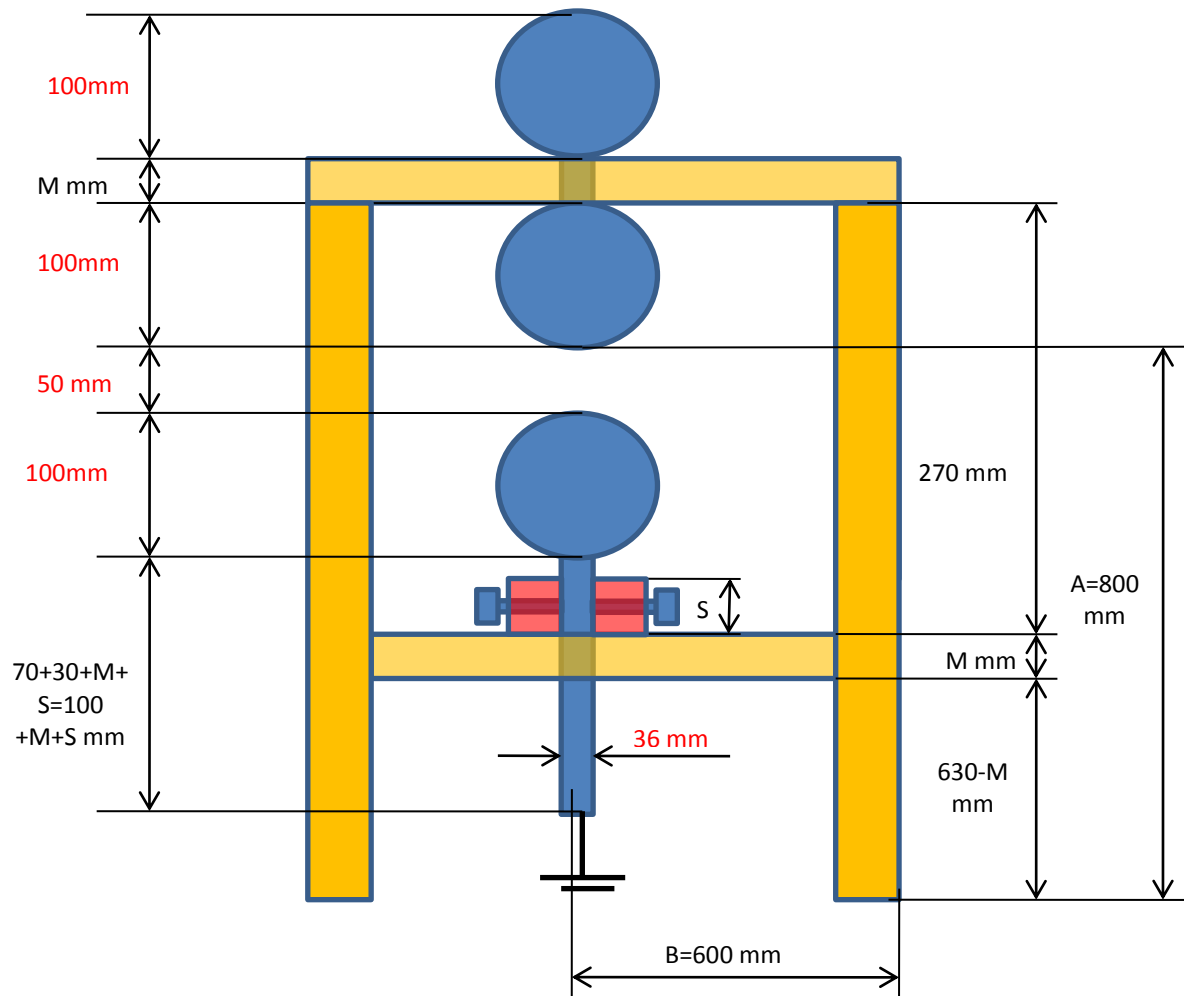


Figura 3.5.- Diseño definitivo acotado con distancia entre esferas nula. [Elaboración propia].



*Figura 3.6.- Diseño definitivo acotado con distancia entre esferas máxima.
[Elaboración propia].*

Para el diámetro de los cilindros, de las esferas y la separación máxima entre ellas se han utilizado los valores obtenidos anteriormente.

Para el cálculo de las dimensiones de la estructura de madera se ha hecho referencia a la figura 3.1, donde se representan las distancias mínimas que marca el estándar IEEE hasta cualquier estructura externa al explosor, A y B. Para fijar estas distancias, se han utilizado los valores de la tabla 3.1, en la cual se muestran los valores en función del radio de las esferas y la separación entre éstas.

La distancia A representa la distancia mínima desde la parte inferior del electrodo en tensión hasta el plano de tierra. Ésta depende del diámetro de las esferas y como se puede ver en la tabla 3.1 para un diámetro de 10 cm, dicho valor ha de estar comprendido entre:

$$6D \leq A \leq 8D \quad (3.23)$$

En este caso se ha elegido el valor máximo para asegurar que cumple la normativa incluso empleando tornillos para ensamblar la madera de la estructura, por lo que dicha distancia será:

$$A = 8D = 8 \cdot 10 = 80 \text{ cm}$$

Respecto a la distancia B, representa el espacio libre de estructuras externas al explosor. Esta distancia, depende de la separación máxima entre esferas, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} B &= 12 \cdot S \\ B &= 12 \cdot 5 = 60 \text{ cm} \end{aligned} \tag{3.24}$$

En la fase final de diseño, Oficina Técnica recomendó reducir esta distancia (B=32 cm) para garantizar que el transporte de la estructura fuera posible a través de ascensores, pues el Laboratorio de Investigación y Ensayos de Alta Tensión (LINEALT) está en una segunda planta. En cualquier caso como esta distancia no está relacionada con estructuras metálicas, hay que decir que no está previsto un cambio fundamental en el funcionamiento del explosor por esta modificación.

En las figuras, se muestran dos medidas con letra, las cuales hacen referencia al espesor de la madera (M) y al espesor del sistema de ajuste para el electrodo inferior (S), las cuales se dejan a la libertad de criterio de oficina técnica. Estas dos medidas afectan directamente a la generatriz del cilindro del electrodo inferior como se ha indicado en la figura.

4. Ensayos

En este capítulo se van a mostrar los ensayos llevados a cabo con el explosor de esferas diseñado. En primer lugar se comprobó si estaba exento de descargas parciales y una vez hecha esta comprobación se llevaron a cabo los ensayos para determinar la tensión de ruptura dieléctrica del aire. El primero de los ensayos consistió en determinar la tensión de ruptura dieléctrica del aire aplicando tensión en corriente alterna a 50 Hz para distintas distancias entre explosores y en el segundo ensayo se determinó la tensión de ruptura dieléctrica del aire aplicando impulsos de tensión tipo rayo.

4.1. Descargas parciales

Durante este apartado se tratará de caracterizar la aparición de descargas parciales en el explosor de esferas diseñado. Para detectar la aparición de descargas parciales y determinar la magnitud de éstas en el caso de que las hubiera se recurrió a medir la carga aparente de las descargas parciales existentes. Este ensayo es necesario para verificar que no hay descargas parciales tipo corona en la superficie de las esferas (por un mal proceso de pulido de sus superficies), pues en ese caso, estas descargas podrían provocar una ruptura del gap de aire a tensiones inferiores a las del diseño original.

En este método de medida de descargas parciales hay que emplear un calibrador el cual determina la sensibilidad para detectar una carga conocida, medidas en picoCulombios (pC). Para ello y una vez realizado el montaje en el laboratorio de alta tensión (LINEALT) del circuito de generación de alta tensión en corriente alterna e integrando el explosor de esferas a éste, se procedió a conectar el calibrador al explosor de esferas.

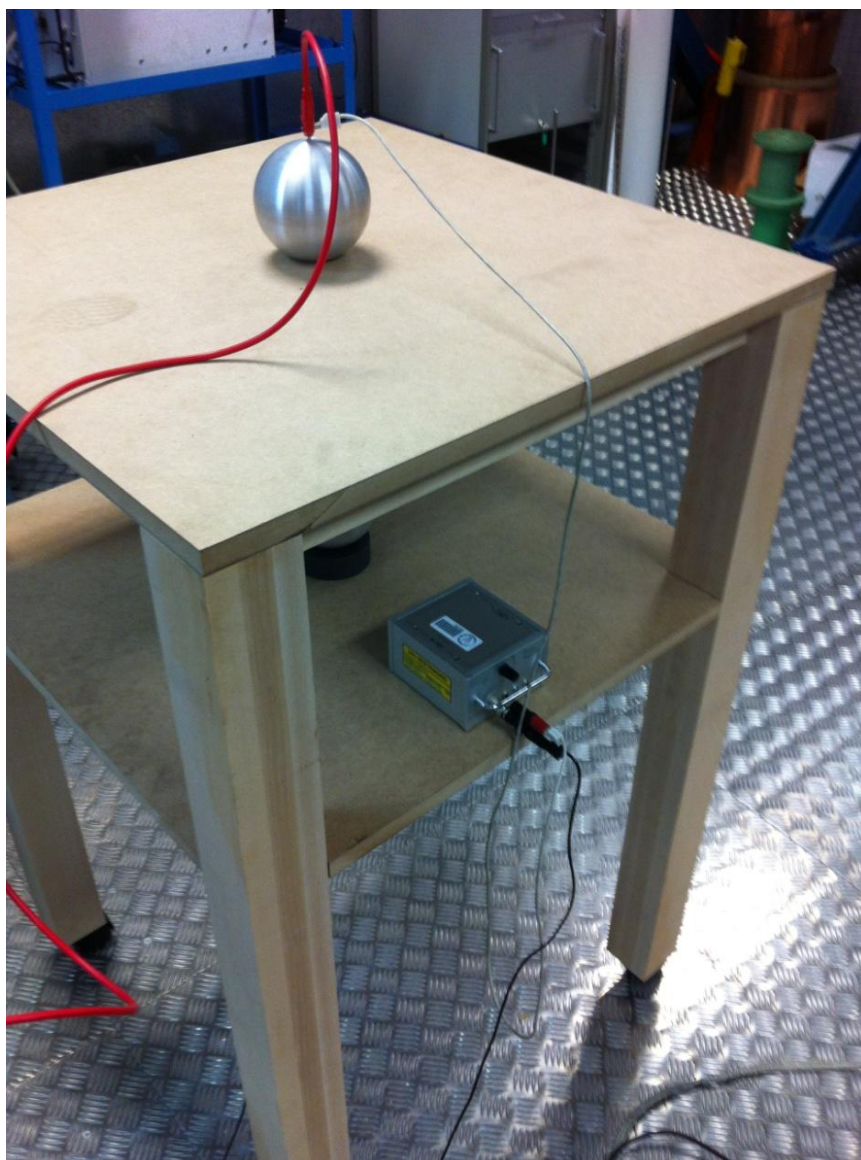


Figura 4.1: Explosor de esferas con calibrador integrado. [Elaboración propia].

Una vez realizado el montaje y como se explica en el Anexo I, se procedió a la calibración, necesaria para cada objeto a medir. En este caso, se calibró a 5 pC, siendo equivalente a 3,5 mV.

En principio el explosor de esferas debería estar exento de cualquier tipo de descarga parcial hasta la tensión de diseño (123 kV) y para comprobarlo se le aplicó tensión alterna de manera progresiva. En primer lugar se ajustó la distancia máxima (8,7 cm) entre explosores, para de esta manera asegurarse que no se produciría arco eléctrico. Se fue elevando la tensión hasta llegar a un nivel de tensión (inferior a la nominal de diseño) en el cual se detectó la presencia de descargas parciales de forma acústica.

Debido aparición de estas primeras descargas parciales, se repitió la prueba pero en este caso la tensión se fue elevando más lentamente para poder así determinar el nivel de tensión en el que empezaban a originar las descargas parciales. Se detectó la

aparición de las primeras descargas parciales con tensión igual a 38,9 kV. A continuación se muestra el diagrama “Phase Resolved Partial Discharge” (diagrama PRPD) registrado por el equipo comercial PDCheck ([Docavo, 2008]) en el cual se observan los pulsos de tensión producidos por cada descarga parcial.

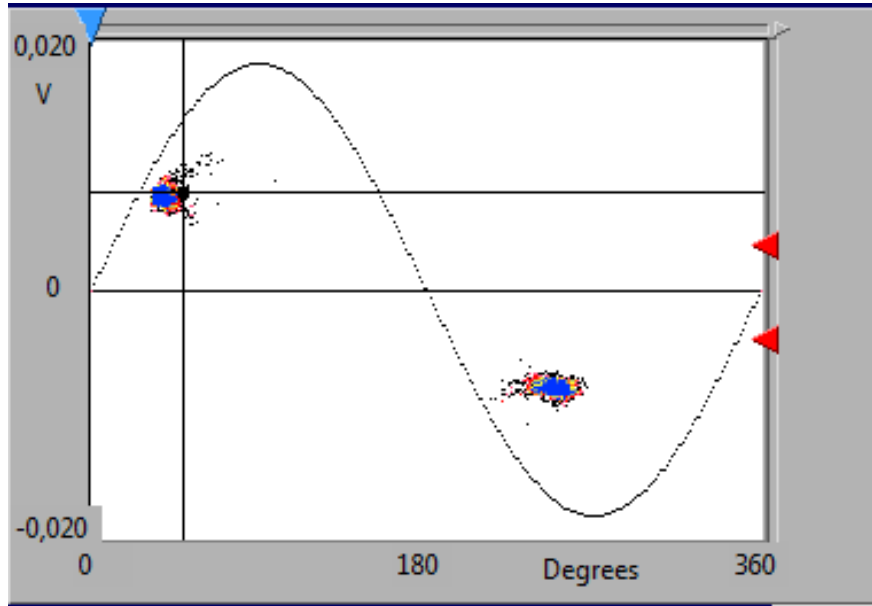


Figura 4.2: Diagrama PRPD de descargas parciales con tensión alterna $U= 28,9$ kV. [Elaboración propia].

Como se explica en el Anexo I, las descargas parciales son fenómenos estocásticos por lo que para conocer su magnitud es necesario tratar estadísticamente los datos obtenidos. Debido a que éstos se ajustan bien a una distribución estadística Weibull ([Dissado, 1992]) se obtienen los valores de α y β los cuales determinan la magnitud estadísticamente fiable de las descargas parciales.

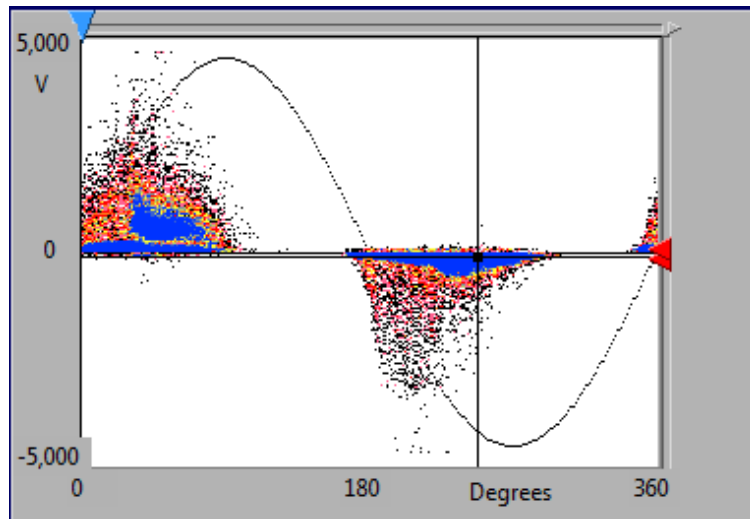
$$\alpha = 8,9 \text{ mV}$$

$$\beta = 14,35$$

$$Q_{\max 95\%} = 9,3 \text{ mV}$$

Por tanto, en el montaje se detectan descargas parciales de magnitud superior a 5pC a una tensión inferior a la nominal de diseño.

Durante este ensayo no solo se comprobó la aparición de descargas parciales, sino también que para la máxima separación entre esferas no se produjera la ruptura dieléctrica aplicando el máximo nivel de tensión disponible en el laboratorio. Durante este proceso, se comprobó que las descargas parciales y sus magnitudes iban en aumento como se puede apreciar en la siguiente figura, en la cual se muestra el diagrama PRPD para una tensión igual a 122,8 kV.



*Figura 4.3: Diagrama PRPD de descargas parciales con tensión alterna $U=122,8$ kV.
[Elaboración propia].*

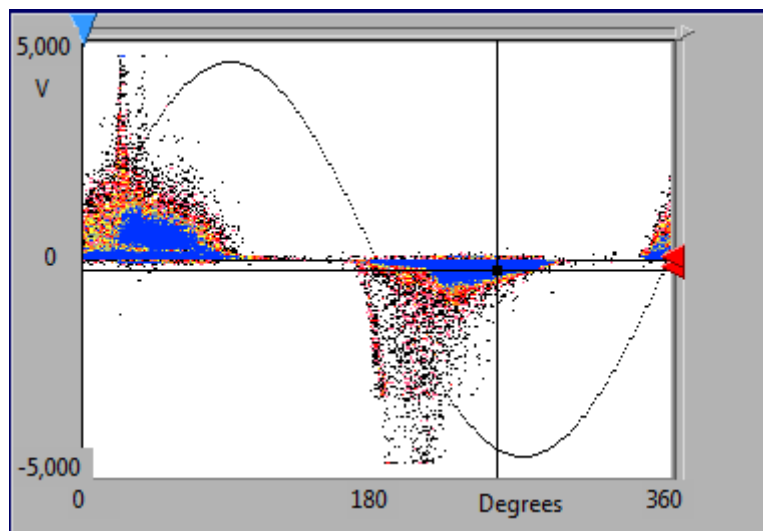
Y ajustando los datos obtenidos a una distribución estadística Weibull como se ha citado anteriormente se obtiene:

$$\alpha = 174,2 \text{ mV}$$

$$\beta = 0,94$$

$$Q_{\max 95\%} = 504,5 \text{ mV}$$

De igual forma, se llegó hasta la tensión máxima disponible en LINEALT, 140 kV y como estaba previsto se comprobó que no se producía arco eléctrico para la máxima separación entre explosores. Seguidamente, se muestra el diagrama PRPD de las descargas parciales en este nivel de tensión así como los parámetros que definen su magnitud.



*Figura 4.4: Diagrama PRPD de descargas parciales con tensión alterna $U=140$ kV.
[Elaboración propia].*

Siendo las magnitudes de las descargas parciales para este nivel de tensión:

$$\alpha = 199 \text{ mV}$$

$$\beta = 0,89$$

$$Q_{\max 95\%} = 608,1 \text{ mV}$$

Por tanto, el explosor de esferas soporta adecuadamente la tensión nominal máxima del laboratorio, a pesar de la aparición prematura de descargas parciales. Esto se debe a que el tipo de descargas detectadas no son tipo corona, sino internas (según el PRPD, ver Anexo I), que se asocian al efecto “cuña” del aire entre las esferas y la madera con la que están en contacto. Esta fuente de descargas no provoca la ignición de la descarga total en el espacio entre esferas, por lo que el explosor es seguro en este sentido. En cualquier caso, si el explosor se emplea como limitador de tensión en algún otro experimento, se debe tener en consideración que a partir de 38kV aparecerán descargas de magnitud superior a 5 pC, llegando hasta los 868,71 pC para 140kV.

4.2. Determinación de tensión de ruptura dieléctrica para impulso de tensión alterna a 50 Hz.

En este capítulo se va a determinar la tensión de ruptura dieléctrica del aire aplicando impulsos de tensión en corriente alterna a 50 Hz para distintas distancias de separación entre explosores. A la hora de estudiar los procesos de ruptura dieléctrica en aislantes se ha de tener en cuenta que estos procesos se ven afectados por diversos factores. En este caso el aislante a estudio es el aire, el cuál se ve afectado principalmente por las condiciones ambientales del lugar donde se llevan a cabo los ensayos. Por este motivo, es necesario realizar varios ensayos sobre el material aislante.

En primer lugar se va a explicar el trato al que son sometidos los datos obtenidos en los ensayos para determinar la tensión de ruptura dieléctrica. Para ello y debido a la naturaleza estocástica del fenómeno de ruptura dieléctrica, variable en el tiempo, éstos se ajustan bien a distribuciones estadísticas acumulativas de Weibull [(Dissado, 1992)] que para el caso de una variable genérica “ U_i ” responden a la forma general:

$$P(U_i) = 1 - e^{-(U_i/\alpha)^\beta} \quad (4.1)$$

Donde:

$P(U_i) \rightarrow$ Probabilidad de que se produzca ruptura dieléctrica para un valor U_i ó inferior.

$\alpha \rightarrow$ Valor característico de U_i .

$\beta \rightarrow$ Factor de forma.

Los valores α y β son magnitudes relacionadas con la distribución estadística de Weibull, siendo α el valor característico, análogo a la media de una distribución normal, y β el factor de forma de la distribución y cuyo valor depende de la dispersión de los datos obtenidos, siendo mayor cuanto menos dispersa sea la distribución.

Una vez obtenidos los resultados y para poder aproximar el fenómeno de la ruptura dieléctrica a través de dicha distribución, se ha de llevar a cabo la siguiente metodología. En primer lugar, y una vez obtenidos los resultados de los distintos ensayos, se han de ordenar de menor a mayor los datos obtenidos de tensión (U_i) para de esta manera asignar a cada medida una probabilidad acumulativa.

$$P(U_i) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad (4.2)$$

Donde:

$i \rightarrow$ Posición que ocupa cada ensayo.

$n \rightarrow$ Número total de ensayos.

Una vez obtenidos los puntos experimentales ($U_i, P(U_i)$) y para calcular los parámetros de Weibull α y β se realiza una regresión por mínimos cuadrados de la ecuación 4.1, para lo cual se aplican logaritmos naturales a ambos lados de la igualdad:

$$\ln(1 - P(U_i)) = -\left(\frac{U_i}{\alpha}\right)^\beta \quad (4.3)$$

Y aplicando de nuevo logaritmos naturales a ambos lados de la ecuación 4.3:

$$\ln(-\ln(1 - P(U_i))) = \beta \cdot \ln(U_i) - \beta \cdot \ln(\alpha) \quad (4.4)$$

Obteniéndose de ésta última una ecuación lineal de la forma $y = \beta \cdot x + b$, donde β es la pendiente de la recta de regresión por mínimos cuadrados y los valores de x, y, b y α son:

$$x = \ln(U_i) \quad (4.5)$$

$$y = \ln(-\ln(1 - P(i, v))) \quad (4.6)$$

$$b = -\beta \cdot \ln(\alpha) \quad (4.7)$$

$$\alpha = e^{-b/\beta} \quad (4.8)$$

Una vez explicado el procedimiento para determinar la tensión de ruptura dieléctrica de forma experimental y antes de continuar con los resultados obtenidos, se va a realizar una breve explicación del método llevado a cabo para la obtención de los resultados de los distintos ensayos llevados a cabo en el laboratorio de alta tensión (LINEALT).

En primer lugar se realizó el montaje del circuito de generación de alta tensión en corriente alterna a 50 Hz en el cual se integró el explosor de esferas.



Figura 4.5: Montaje del circuito de generación de impulsos de alta tensión en corriente alterna a frecuencia 50 Hz y explosor de esferas. [Elaboración propia].

El proceso seguido fue ir elevando la tensión aplicada hasta que produciéndose ruptura dieléctrica y anotando dicho valor de tensión reflejado en la fuente de tensión. Se repitió el proceso 10 veces para cada una de las distintas separaciones entre explosores de 1 cm, 3,7 cm, 4,5 cm y 5,5 cm, las cuales se ajustaron de manera manual.

Respecto a la fuente de tensión hay que destacar que su límite de tensión eran 140 kV y su tolerancia del 1% de la tensión aplicada.

4.2.1. Tensión de ruptura dieléctrica aplicando tensión alterna a 50 Hz. GAP 1 cm.

A continuación se va a determinar la tensión de ruptura dieléctrica del aire aplicando tensión en corriente alterna a 50 Hz y para una separación entre esferas de 1 cm.

En primer lugar cabe recordar la tensión de ruptura dieléctrica prevista por el estándar IEEE para la separación entre explosores $S = 1 \text{ cm}$ es $31,7 \text{ kV}$. Por otro lado, a partir de la ecuación de Schumann (4.1) ([Kuffel, E., 2000]) es calculada la tensión de ruptura dieléctrica teórica bajo las condiciones atmosféricas y la separación entre esferas con las que se llevaron a cabo los ensayos.

$$U_b = 24,36 \cdot P \cdot S + 6,72 \cdot \sqrt{P \cdot S} \quad (4.9)$$

La presión atmosférica del laboratorio de alta tensión (LINEALT) durante el ensayo fue de $P = 1,016 \text{ bar}$, por lo que para una separación entre esferas de $S = 1 \text{ cm}$ se obtiene una tensión de ruptura dieléctrica teórica $U_b = 31,52 \text{ kV}$.

Una vez conocidas las tensiones de ruptura dieléctrica teóricamente previstas, se procede a determinar la tensión de ruptura dieléctrica experimentalmente. Para ello y debido a la naturaleza estocástica de los datos obtenidos en los ensayos se sigue el procedimiento anteriormente desarrollado para ajustar los datos a la distribución estadística acumulativa tipo Weibull ([Dissado, 1992]).

A continuación se muestran los valores de tensiones de ruptura dieléctrica obtenidos en los 10 ensayos llevados a cabo para una distancia entre esferas de 1 cm. En la tabla ya se muestran ordenados de menor a mayor, para de esta manera asignarles una probabilidad acumulada como anteriormente se ha visto a partir de la ecuación 4.2 ($P(i, v)$). En la tabla se muestran los valores eficaces de las tensiones de ruptura dieléctrica ($U_{b \text{ rms}}$) ya que éstos son una lectura directa de la fuente de tensión pero también se muestran los valores pico de tensión ($U_{b \text{ pico}}$) ya que serán éstos los empleados para los cálculos.

Ensayo	$U_{b \text{ rms}}(\text{kV})$	$U_{b \text{ pico}}(\text{kV})$	$P(i, U)$
1	21,93	31,01	0,067
2	21,94	31,03	0,163
3	21,97	31,07	0,260
4	22	31,11	0,356
5	22	31,11	0,452
6	22,05	31,18	0,548
7	22,12	31,28	0,644
8	22,13	31,30	0,740
9	22,14	31,31	0,837
10	22,19	31,38	0,933

Tabla 4.1: Tensiones de ruptura dieléctrica para separación de 1 cm aplicando tensión en corriente alterna a 50 Hz y sus respectivas probabilidades acumuladas. [Elaboración propia].

Una vez obtenidos los pares de puntos $(U_i, P(i, U))$, se ajustan a la distribución estadística acumulativa Weibull ([Dissado, 1992]) y mediante una regresión por mínimos de cuadrados de la ecuación 4.1 se obtienen los parámetros de la distribución estadística α y β . Para obtener la ecuación lineal de la forma $y = \beta \cdot x + b$ a partir de una regresión por mínimos cuadrados de la ecuación 4.4 es necesario representar en los ejes x e y con las ecuaciones 4.5 y 4.6 respectivamente.

Ensayo	$U_{b\ rms}(kV)$	$U_{b\ pico}(kV)$	$P(i, U)$	x	y
1	21,93	31,01	0,067	3,434	-2,664
2	21,94	31,03	0,163	3,435	-1,723
3	21,97	31,07	0,260	3,436	-1,202
4	22	31,11	0,356	3,438	-0,822
5	22	31,11	0,452	3,438	-0,509
6	22,05	31,18	0,548	3,440	-0,230
7	22,12	31,28	0,644	3,443	0,033
8	22,13	31,30	0,740	3,444	0,299
9	22,14	31,31	0,837	3,444	0,594
10	22,19	31,38	0,933	3,446	0,993

Tabla 4.2: Relación de datos obtenidos para distancia de separación 1 cm.
[Elaboración propia].

Representando los pares de puntos (x, y) y realizando la regresión por mínimos cuadrados:

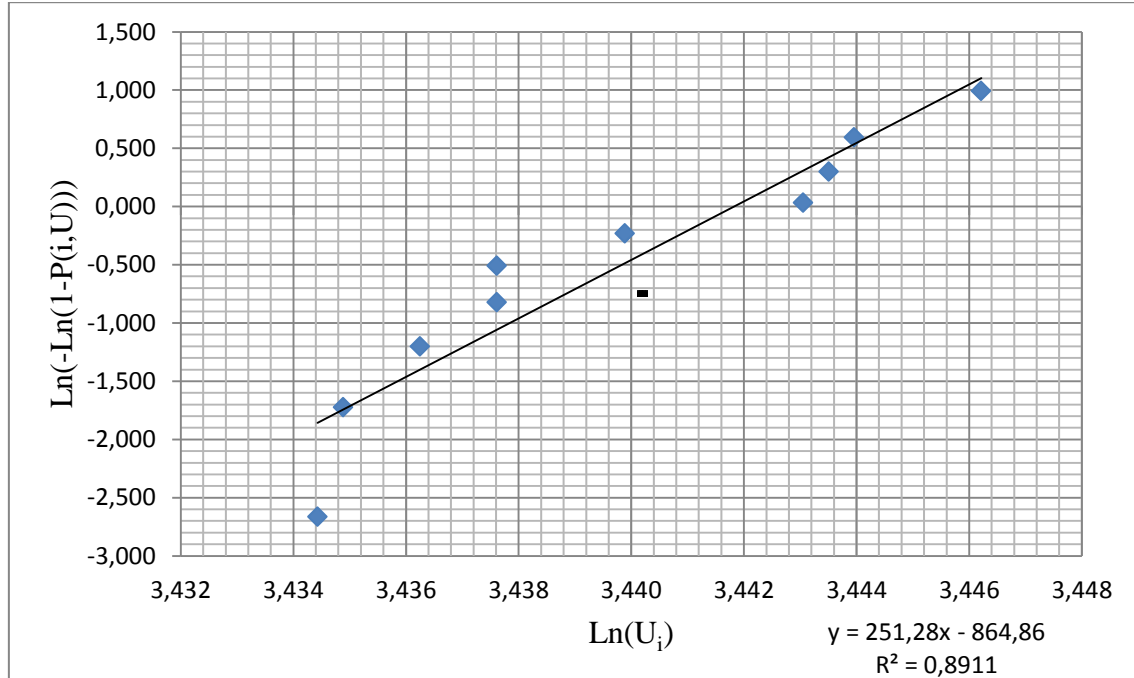


Figura 4.6: Representación de los datos obtenidos para distancia de separación 1 cm.
[Elaboración propia].

Representando los pares de puntos (x, y) y realizando la regresión por mínimos cuadrados se obtiene la ecuación lineal:

$$y = 251,28 \cdot x - 864,86 \quad (4.10)$$

De donde se obtienen β siendo la pendiente de la recta obtenida y α sustituyendo en la ecuación 4.8:

$$\alpha = 31,24 \text{ kV}$$

$$\beta = 251,28$$

El coeficiente de correlación lineal de la distribución es $r = 0,944$.

4.2.2. Tensión de ruptura dieléctrica aplicando tensión alterna a 50 Hz. GAP 3,7 cm.

En este caso se va a determinar la tensión de ruptura dieléctrica del aire aplicando tensión en corriente alterna a 50 Hz para una separación entre esferas de 3,7 cm.

Antes de comenzar con el método experimental, es conveniente recordar la tensión de ruptura dieléctrica prevista por el estándar IEEE. En este caso debido a que no es una distancia de separación entre esferas normalizada, es necesario interpolar los datos de la tabla del estándar IEEE obteniendo para una separación entre esferas $S = 3,7 \text{ cm}$ una tensión de ruptura dieléctrica prevista de $U_b = 100 \text{ kV}$. Haciendo uso de la ecuación de Schumann ([Kuffel, E., 2000]) se puede determinar la tensión de ruptura dieléctrica teórica bajo las condiciones ambientales del laboratorio de alta tensión (LINEALT) donde se llevaron a cabo los ensayos. La presión atmosférica durante los ensayos fue $P = 1,016 \text{ bar}$, por lo que para una separación entre explosores $S = 3,7 \text{ cm}$ y sustituyendo en la ecuación 4.9 se obtiene una tensión de ruptura dieléctrica teórica $U_b = 104,6 \text{ kV}$.

Tras conocer las tensiones de ruptura dieléctrica previstas se procede a determinar la tensión de ruptura dieléctrica para una separación entre esferas de 3,7 cm. A continuación se muestran los resultados obtenidos en los 10 ensayos llevados a cabo para esta distancia entre esferas.

Ensayo	$U_{b \text{ rms}}(\text{kV})$	$U_{b \text{ pico}}(\text{kV})$	$P(i, U)$	x	y
1	67,58	95,57	0,067	4,560	-2,664
2	70,26	99,36	0,163	4,599	-1,723
3	70,47	99,66	0,260	4,602	-1,202
4	70,52	99,73	0,356	4,602	-0,822
5	70,73	100,03	0,452	4,605	-0,509
6	72,17	102,06	0,548	4,626	-0,230
7	72,2	102,11	0,644	4,626	0,033
8	72,4	102,39	0,740	4,629	0,299
9	72,78	102,93	0,837	4,634	0,594
10	72,82	102,98	0,933	4,635	0,993

Tabla 4.3: Relación de datos obtenidos para distancia de separación 3,7 cm.
[Elaboración propia].

En la tabla 4.3 se muestran los valores de tensiones de ruptura dieléctrica obtenidos en los distintos ensayos así como sus probabilidades acumuladas. De la misma manera que anteriormente los pares de puntos obtenidos $(U_i, P(i, U))$, se ajusta a la distribución estadística acumulativa Weibull ([Dissado, 1992]) y mediante una regresión por mínimos cuadrados de la ecuación 4.4 se obtienen los valores de α y β . Para ello en la tabla 3 se muestran los valores de x e y , ecuaciones 4.5 y 4.6 respectivamente, necesarios para representar la ecuación 4.4 y así obtener la ecuación lineal de la forma $y = \beta \cdot x + b$ a partir de una regresión de mínimos cuadrados.

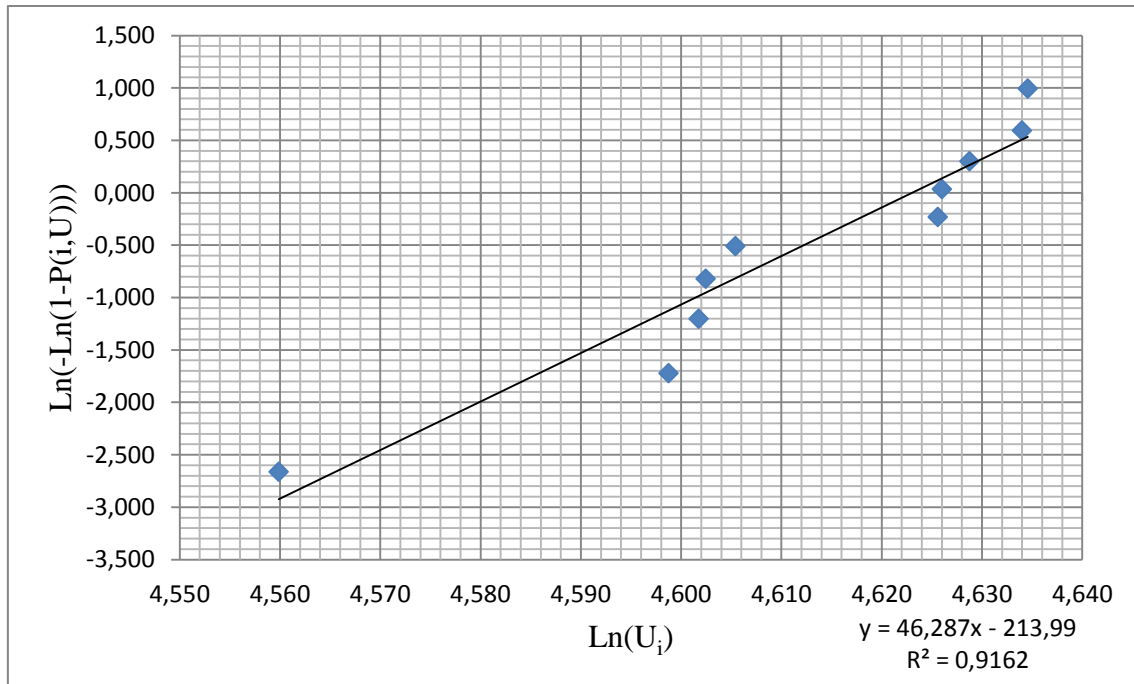


Figura 4.7: Representación de los datos obtenidos para distancia de separación 3,7 cm. [Elaboración propia].

Una vez representados los pares de puntos y realizando la regresión por mínimos cuadrados se obtiene la siguiente ecuación lineal de la que se obtienen α y β , siendo β la pendiente de la recta y α se obtiene sustituyendo en la ecuación 4.8.

$$y = 46,29 \cdot x - 213,99 \quad (4.11)$$

Por tanto:

$$\alpha = 101,78 \text{ kV}$$

$$\beta = 46,29$$

Y el coeficiente de correlación lineal de la distribución es $r = 0,957$.

4.2.3. Tensión de ruptura dieléctrica aplicando tensión alterna a 50 Hz. GAP 4,5 cm.

A continuación se va a determinar la tensión de ruptura dieléctrica del aire aplicando tensión en corriente alterna a 50 Hz con una separación entre esferas de 4,5 cm.

Antes de comenzar con el método experimental es conveniente recordar que el estándar IEEE para una distancia entre esferas $S = 4,5 \text{ cm}$ prevé una tensión de ruptura dieléctrica $U_b = 115 \text{ kV}$. La ecuación de Schumann ([Kuffel, E., 2000]), ecuación 4.9, permite determinar la tensión de ruptura dieléctrica teórica en función de la distancia entre explosores y las condiciones ambientales bajo las que se llevan a cabo los ensayos. En este caso para la distancia entre esferas $S = 4,5 \text{ cm}$ y presión atmosférica $P = 1,016 \text{ bar}$, la tensión de ruptura dieléctrica teórica es $U_b = 125,74 \text{ kV}$.

Después de conocer las tensiones de ruptura dieléctrica previstas, se procede a determinar ésta de forma experimental. Para ello se reguló manualmente la distancia entre esferas de $4,5 \text{ cm}$ y una vez ajustada se comenzó a realizar los 10 ensayos anotando las tensiones de ruptura dieléctrica obtenidas.

En la tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos en los 10 ensayos ya ordenados de menor a mayor y con sus respectivas probabilidades acumuladas calculadas con la ecuación 4.2.

Ensayo	$U_{b \text{ rms}}(\text{kV})$	$U_{b \text{ pico}}(\text{kV})$	$P(i, U)$	x	y
1	82,3	116,39	0,067	4,757	-2,664
2	83,44	118,00	0,163	4,771	-1,723
3	83,48	118,06	0,260	4,771	-1,202
4	83,77	118,47	0,356	4,775	-0,822
5	83,8	118,51	0,452	4,775	-0,509
6	83,92	118,68	0,548	4,776	-0,230
7	84,01	118,81	0,644	4,778	0,033
8	84,05	118,86	0,740	4,778	0,299
9	84,09	118,92	0,837	4,778	0,594
10	84,2	119,08	0,933	4,780	0,993

Tabla 4.4: Relación de datos obtenidos para distancia de separación $4,5 \text{ cm}$.
[Elaboración propia].

Obtenidos los pares de puntos $(U_i, P(i, U))$ se ajusta el fenómeno de ruptura dieléctrica a la distribución estadística acumulativa Weibull ([Dissado, 1992]) para mediante una regresión por mínimos cuadrados de la ecuación 4.4 obtenerse los valores de α y β . En la tabla 4 se muestran el resultado de las ecuaciones 4.5 y 4.6, x e y , para de esta manera representar la ecuación 4.4 y mediante una regresión por mínimos cuadrados obtener la ecuación lineal de la forma $y = \beta \cdot x + b$ para calcular los parámetros α y β de la distribución así como su coeficiente de correlación lineal.

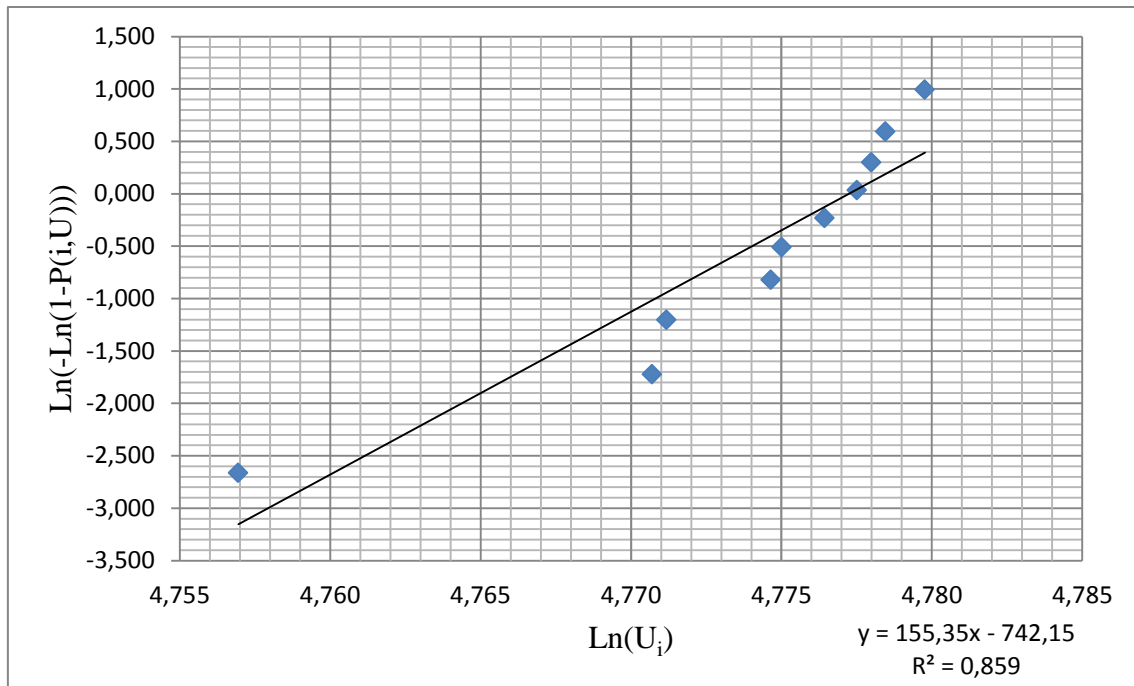


Figura 4.8: Representación de los datos obtenidos para distancia de separación 4,5 cm. [Elaboración propia].

Una vez realizada la regresión por mínimos cuadrados se obtiene la ecuación lineal:

$$y = 155,35 \cdot x - 742,15 \quad (4.12)$$

Una vez obtenida la ecuación 4.12 se obtiene β siendo la pendiente de la recta y obteniendo α sustituyendo en la ecuación 4.8:

$$\alpha = 118,78 \text{ kV}$$

$$\beta = 155,35$$

Siendo el coeficiente de correlación lineal $r = 0,927$.

4.2.4. Tensión de ruptura dieléctrica aplicando tensión alterna a 50 Hz. GAP 5,5 cm.

De nuevo se va a determinar la tensión de ruptura dieléctrica del aire pero en este caso la separación entre esferas es de 5,5 cm. Debido a que la distancia entre explosores es mayor que el radio de éstos $R = 5 \text{ cm}$, a diferencia de en ensayos anteriores, la homogeneidad del campo eléctrico entre esferas no está garantizada por lo que los valores obtenidos experimentalmente pueden tener una mayor incertidumbre que los obtenidos anteriormente.

Antes de comenzar con el método experimental para determinar la tensión de ruptura dieléctrica para esta separación entre esferas, es conveniente recordar la tensión de ruptura dieléctrica prevista por el estándar IEEE, la cual se muestra en sus tablas el valor entre paréntesis indicando la incertidumbre del valor, siendo $U_b = 131 \text{ kV}$. A

partir de la ecuación de Schumann ([Kuffel, E., 2000]), ecuación 4.9, se determina la tensión de ruptura dieléctrica teórica, que para una separación entre explosores $S = 5,5 \text{ cm}$ y una presión atmosférica $P = 1,016 \text{ bar}$ se obtiene $U_b = 152 \text{ kV}$.

Para determinar la tensión de ruptura dieléctrica experimental se procede de manera análoga que en ensayos anteriores y ajustando los datos obtenidos a una distribución estadística acumulativa Weibull ([Dissado, 1992]) a partir de la cual se podrán obtener las magnitudes α y β . En la tabla 4.5 se muestran las tensiones de ruptura dieléctrica de los 10 ensayos llevados a cabo y sus respectivas probabilidades acumuladas calculadas con la ecuación 4.2. También se muestran los valores de x e y , resultados de las ecuaciones 4.5 y 4.6 respectivamente, para de esta manera representar dichos pares de puntos y a partir de una regresión de mínimos cuadrados obtener la ecuación lineal para calcular los parámetros α y β .

Ensayo	$U_{b \text{ rms}}(\text{kV})$	$U_{b \text{ pico}}(\text{kV})$	$P(i, U)$	x	y
1	94,73	133,97	0,067	4,898	-2,664
2	94,99	134,34	0,163	4,900	-1,723
3	95,14	134,55	0,260	4,902	-1,202
4	95,15	134,56	0,356	4,902	-0,822
5	95,19	134,62	0,452	4,902	-0,509
6	95,19	134,62	0,548	4,902	-0,230
7	95,25	134,70	0,644	4,903	0,033
8	95,34	134,83	0,740	4,904	0,299
9	95,38	134,89	0,837	4,904	0,594
10	95,38	134,89	0,933	4,904	0,993

Tabla 4.5: Relación de datos obtenidos para distancia de separación 5,5 cm. [Elaboración propia].

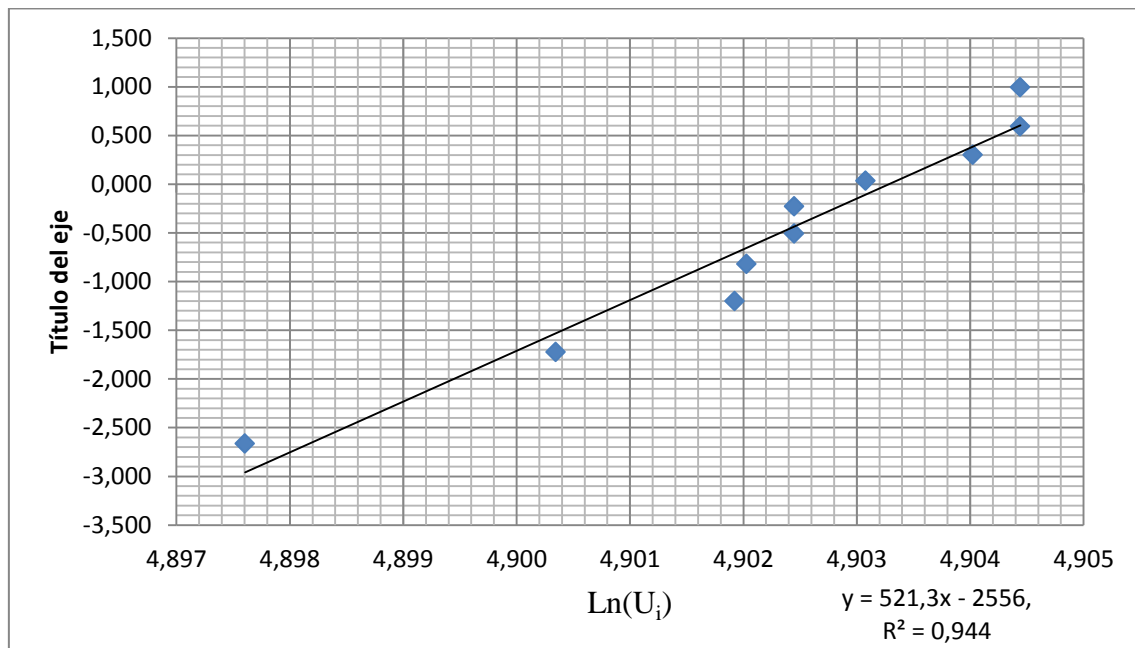


Figura 4.9: Representación de los datos obtenidos para distancia de separación 5,5 cm. [Elaboración propia].

Representada la ecuación 4.4 y realizando el ajuste por mínimos cuadrados se obtiene la siguiente ecuación lineal de la cual se obtienen α como resultado de la ecuación 4.8 y β siendo la pendiente de la ecuación lineal obtenida:

$$y = 521,3 \cdot x - 2556 \quad (4.13)$$

$$\alpha = 134,71 \text{ kV}$$

$$\beta = 521,3$$

Siendo el coeficiente de correlación lineal de la distribución $r = 0,972$.

4.2.5. Resumen datos de rigidez dieléctrica aplicando tensión alterna a 50 Hz.

A continuación se muestra un resumen de los datos de rigidez dieléctrica obtenidos para distintas separaciones entre explosores.

GAP (cm)	$U_{b \text{ IEEE}}$ (kV)	$U_{b \text{ Teórica}}$ (kV)	α (kV)	β	r
1	31,7	31,52	31,24	251,28	0,944
3,7	100	104,6	101,78	46,29	0,957
4,5	115	125,74	118,78	155,35	0,927
5,5	131	152	134,71	521,3	0,972

Tabla 4.6: Resumen de tensiones de ruptura dieléctrica obtenidas.

Como se puede apreciar en la tabla anterior todas las tensiones de ruptura dieléctrica obtenidas experimentalmente están entre los valores previstos por el estándar IEEE y el valor teórico determinado a partir de la ecuación de Schumann ([Kuffel, E., 2000]) exceptuando el caso de separación entre esferas 1 cm, que en este caso es ligeramente inferior a ambos.

Por otro lado β , factor de forma de la distribución Weibull, indica que la variabilidad de los datos obtenidos en los distintos ensayos es pequeña, ya que éste es muy grande ($\beta \gg 2$) en todos los casos y que el ajuste a la distribución Weibull es muy fiable ya que el coeficiente de correlación lineal es cercano a 1.

En el ensayo con distancia de separación entre esferas de 5,5 cm se podría prever una mayor dispersión de los datos obtenidos ya que la distancia entre esferas es mayor que el radio de éstas no pudiéndose asegurar la homogeneidad del campo eléctrico, sin embargo en los ensayos se obtuvo un valor de β muy alto.

4.3. Determinación de tensión de ruptura dieléctrica aplicando impulsos de tensión tipo rayo

En este apartado se va a determinar la tensión de ruptura dieléctrica aplicando impulsos de tensión tipo rayo para distintas distancias de separación entre esferas tanto para polaridad positiva como para polaridad negativa. Para ello se va a utilizar el método experimental “Up and down” (arriba-abajo), cuyo procedimiento se explica a continuación.

El método experimental “Up and down” consiste en la aplicación de distintos niveles de tensión en función del resultado obtenido en el ensayo anterior.

Para aplicar el método “Up and down” en primer lugar ha de fijarse un valor inicial de tensión (U_0), el cual debe ser cercano a la tensión de ruptura dieléctrica prevista. A continuación se elige un incremento de tensión constante (ΔU), el cual es un 3% de la tensión inicial elegida, por lo que $\Delta U = 0,03 \cdot U_0$.

Una vez determinados los valores iniciales se inicia con la metodología del método “Up and down”, consistente en realizar una serie de ensayos con distintos niveles de tensión comprobando si se produce o no ruptura dieléctrica. El primer disparo se realiza con la tensión inicial ($U_1 = U_0$) y se observa si se produce ruptura dieléctrica o no.

- En el caso de que se produzca ruptura dieléctrica, la tensión aplicada en el siguiente disparo se ve disminuida en ΔU , por lo que $U_{i+1} = U_i - \Delta U$.
- Si por el contrario no se produce ruptura dieléctrica, la tensión se ve aumentada en ΔU , siendo $U_{i+1} = U_i + \Delta U$.

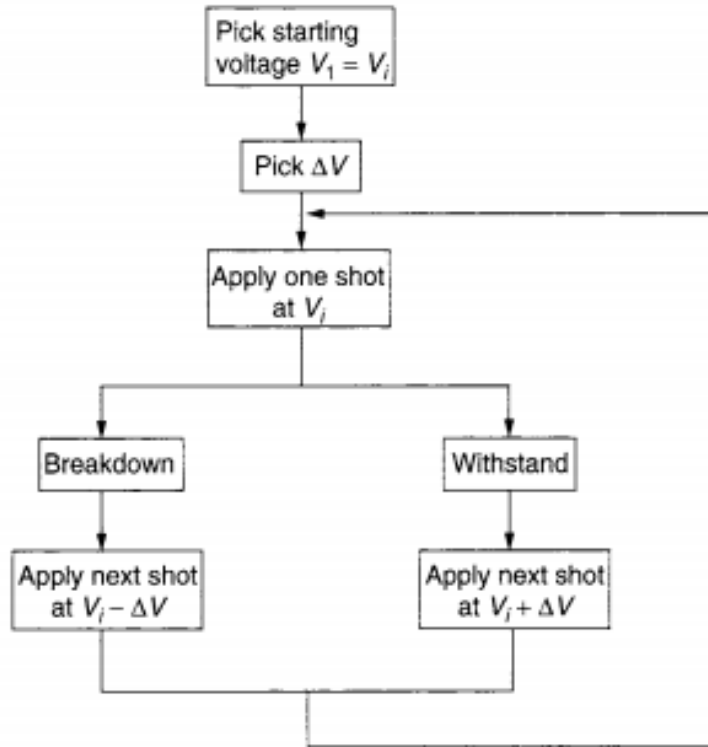
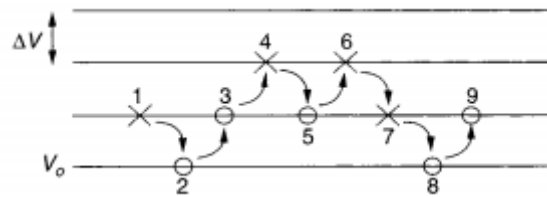


Figura 4.10: Esquema método “Up and down”. [Kuffel, E., 2000].



$\times \rightarrow$ Disparo con ruptura dieléctrica.

$O \rightarrow$ Disparo sin ruptura dieléctrica.

$V_0 \rightarrow$ Nivel de tensión mínimo aplicado.

Figura 4.11: Ejemplo ilustrativo de método “Up and down”. [Kuffel, E., 2000].

El número total de ensayos recomendado ha de ser como mínimo 20 y máximo 40 ($20 \leq n \leq 40$).

Para conocer si se ha producido o no ruptura dieléctrica hay que utilizar un osciloscopio con el cual, analizando las formas de onda asociadas al impulso de tensión tipo rayo producido, se puede determinar si se ha producido ruptura dieléctrica o no. En las siguientes imágenes se muestran las formas de ondas producidas cuando se produce ruptura dieléctrica tanto en polaridad positiva como negativa y las formas de onda cuando no se produce ruptura dieléctrica en ambos casos.

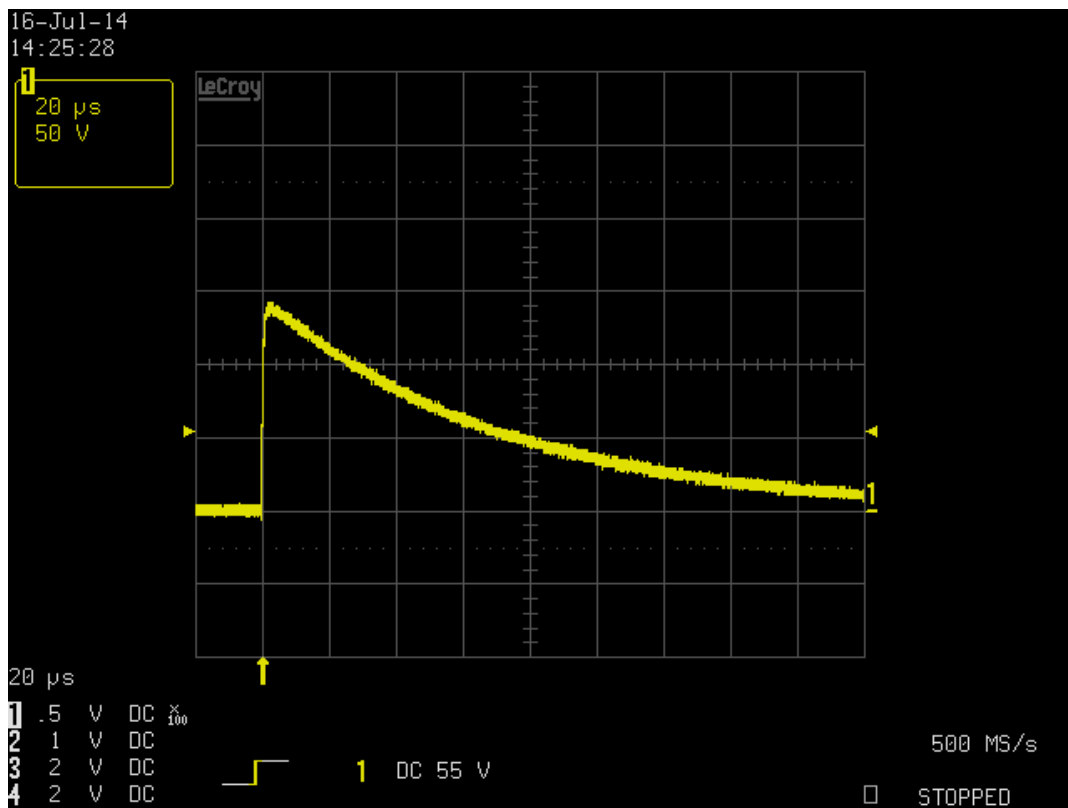


Figura 4.12: Forma de onda de impulso de tensión tipo rayo sin ruptura dieléctrica con polaridad positiva. [Elaboración propia].

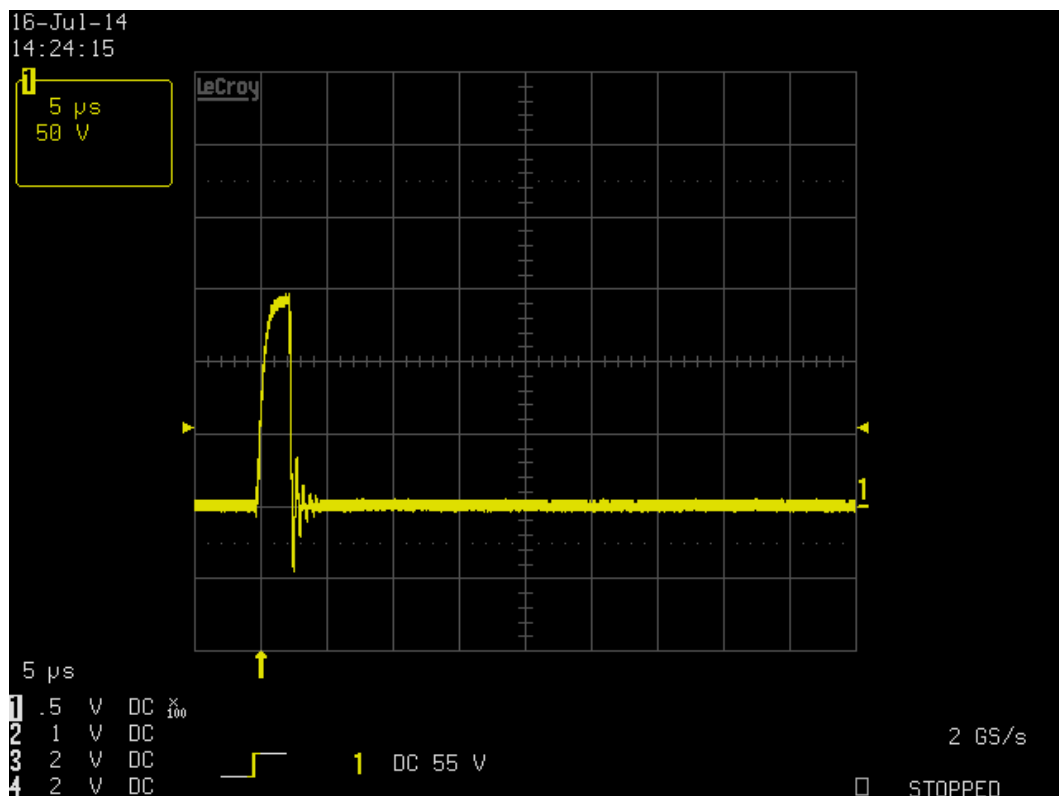


Figura 4.13: Forma de onda de impulso de tensión tipo rayo con ruptura dieléctrica con polaridad positiva. [Elaboración propia].

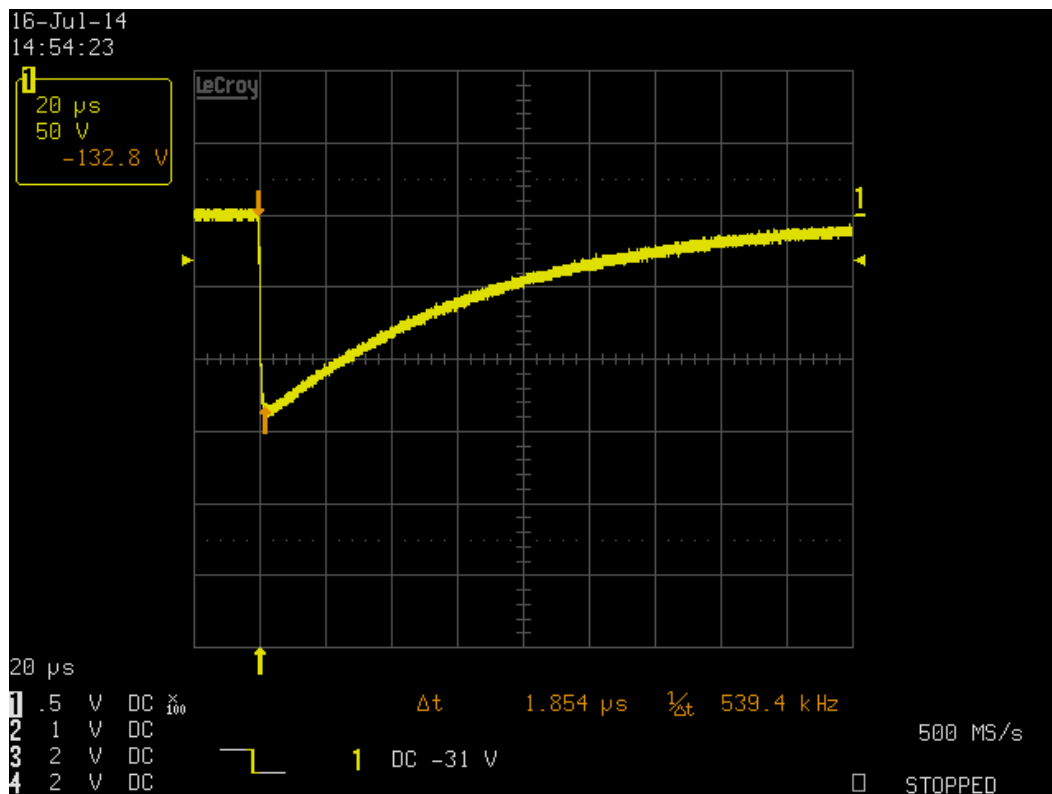


Figura 4.14: Forma de onda de impulso de tensión tipo rayo sin ruptura dieléctrica con polaridad negativa. [Elaboración propia].

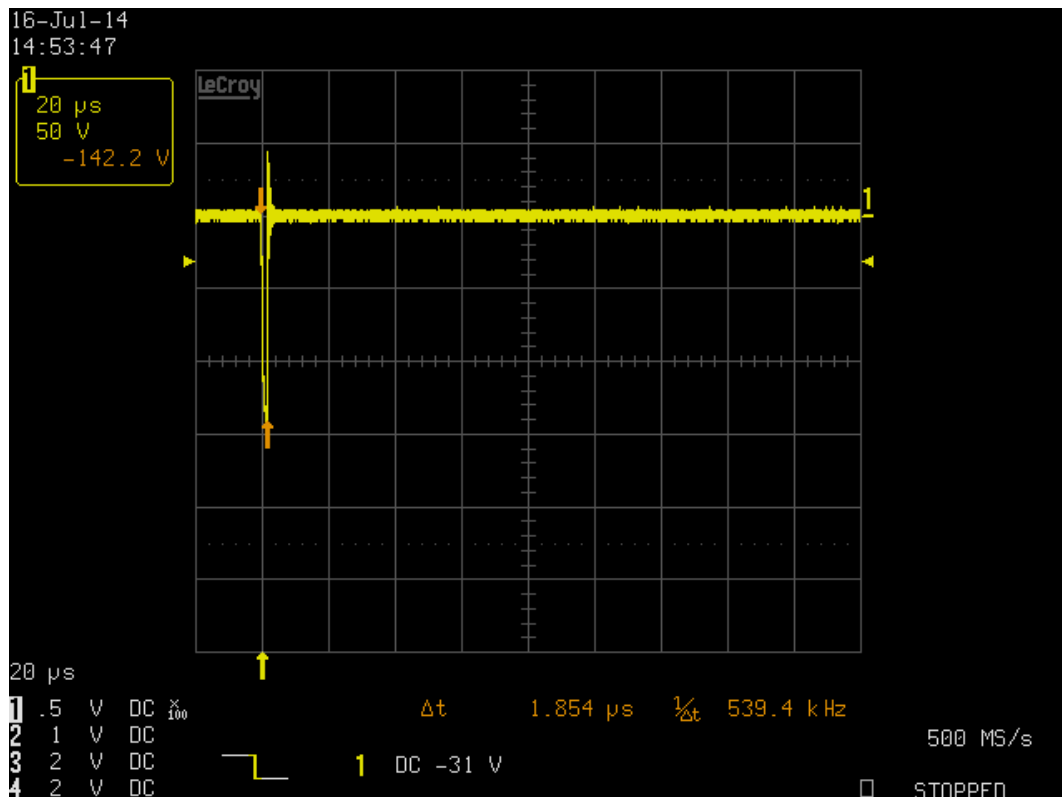


Figura 4.15: Forma de onda de impulso de tensión tipo rayo con ruptura dieléctrica con polaridad negativa. [Elaboración propia].

Una vez realizados los n ensayos y determinado el número de casos, por niveles de tensión, en los cuales se ha producido ruptura dieléctrica ($n_{i,b}$) y en los que no se ha producido ruptura dieléctrica ($n_{i,w}$), a partir de la tensión inicial (U_0) se puede obtener la tensión crítica de ruptura $U_{50\%}$ y su desviación típica σ :

$$U_{50\%} = U_0 + \Delta U \cdot \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (4.1)$$

$$\sigma = 1,62 \cdot \Delta U \cdot \left(\frac{N \cdot B - A^2}{N^2} - 0,029 \right) \quad (4.2)$$

Donde:

$$N = \sum_{i=0}^k n_{i,w} \text{ ó } \sum_{i=0}^k n_{i,b} \quad (4.3)$$

$$A = \sum_{i=0}^k i \cdot n_{i,w} \text{ ó } \sum_{i=0}^k i \cdot n_{i,b} \quad (4.4)$$

$$B = \sum_{i=0}^k i^2 \cdot n_{i,w} \text{ ó } \sum_{i=0}^k i^2 \cdot n_{i,b} \quad (4.5)$$

Con i referida al nivel de tensión, $n_{i,w}$ número de ensayos sin ruptura dieléctrica y $n_{i,b}$ número de ensayos con ruptura dieléctrica en cada nivel.

En la ecuación 4.1 el criterio del signo depende del número de ensayos en los que se produce ruptura dieléctrica y en los que no, tomando el signo positivo para el caso en el que el número de ensayos con ruptura dieléctrica sea mayor que el número de ensayos sin ruptura ($n_{i,b} > n_{i,w}$) y en caso contrario se tomará el signo negativo ($n_{i,w} > n_{i,b}$). Para las ecuaciones (4.3)-(4.5), siempre se operará con el menor de ambos.

Antes de iniciar el análisis de los resultados, es importante destacar algunos aspectos de la fuente de tensión y del circuito utilizado para la generación de los impulsos de tensión tipo rayo. Respecto a la fuente de tensión su límite de tensión era de 140 kV y tolerancia del 1% de la tensión. El circuito empleado para la generación de impulsos tipo rayo tenía una eficiencia de 0,84.

En un primer momento se pensó en realizar los ensayos para distancias entre esferas de 1 cm, 3,7 cm, 4,5 cm y 5,5 cm, pero debido a las características de la fuente

de tensión disponible, estas dos últimas distancias no se pudieron ensayar ya que se excedía el límite de tensión de la fuente.

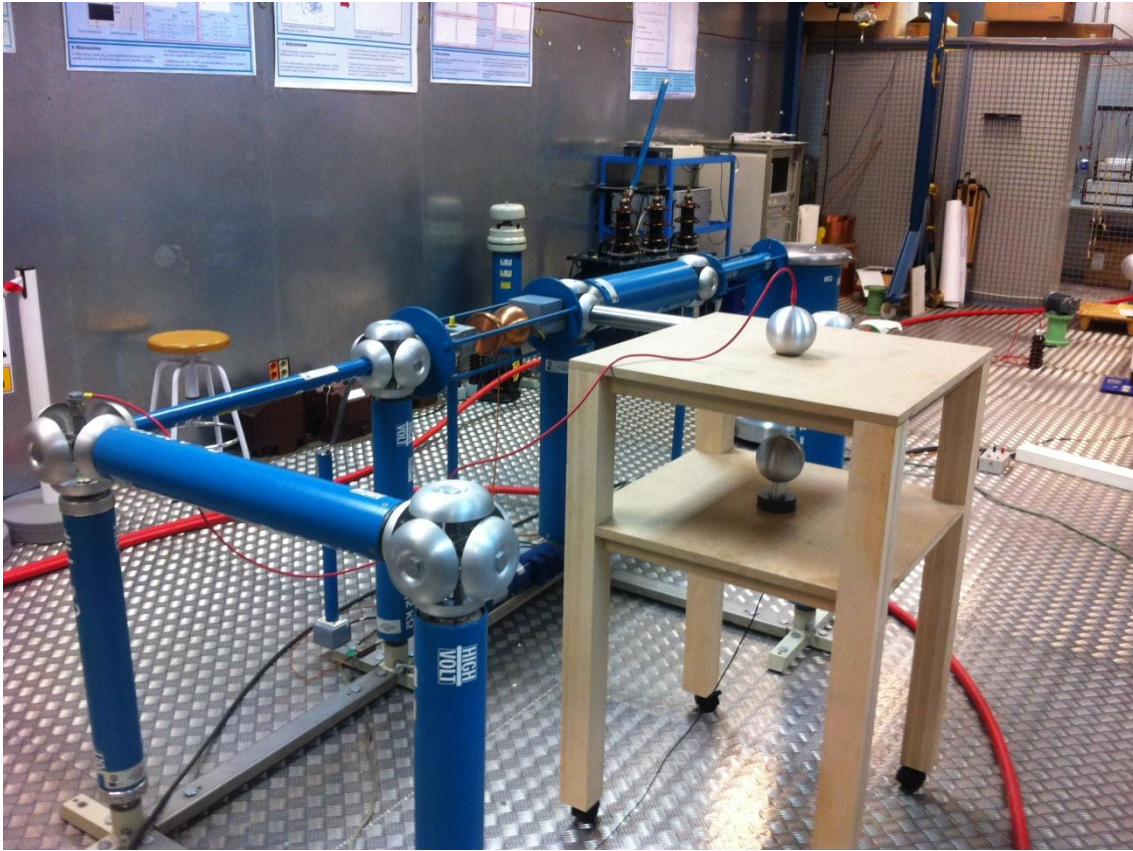


Figura 4.16: Circuito empleado para la generación impulsos de tensión tipo rayo junto con el explosor de esferas. [Elaboración propia].

4.3.1. Impulso tipo rayo. Polaridad positiva. GAP 1 cm

En este apartado se va a determinar la tensión de ruptura dieléctrica ($U_{50\%}$) de manera experimental aplicando el método “Up and down”. En este caso la distancia entre esferas es $S = 1\text{ cm}$, para la cual el estándar IEEE prevé una tensión de ruptura dieléctrica $U_{50\%} = 31,7\text{ kV}$.

Por otro lado, a partir de la ecuación de Schumann (ecuación 4.6) se puede determinar la tensión de ruptura teórica en función de las condiciones ambientales del laboratorio donde se llevaron a cabo los ensayos.

$$U_b = 24,36 \cdot P \cdot S + 6,72 \cdot \sqrt{P \cdot S} \quad (4.6)$$

Que para la presión atmosférica del laboratorio $P = 1,016\text{ bar}$ y separación entre esferas $S = 1\text{ cm}$ corresponde una tensión de ruptura dieléctrica:

$$U_b = 24,36 \cdot 1,016 \cdot 1 + 6,72 \cdot \sqrt{1,016 \cdot 1} = 31,52\text{ kV}$$

Una vez conocidas la tensión de ruptura prevista por el estándar IEEE y la teórica a través de la ecuación de Schumann para esta distancia entre esferas, se procede a calcular la tensión de forma experimental aplicando el método “Up and down”.

Como anteriormente se ha explicado, en primer lugar se selecciona la tensión inicial $U_0 = 31,7 \text{ kV}$, siendo ésta la tensión de ruptura de referencia a 50 Hz y su incremento $\Delta U = 0,03 \cdot U_0 = 0,95 \text{ kV}$.

Una vez fijados los datos iniciales se llevó a cabo el método “Up and down” con un total de 20 ensayos ($n = 20$), cuyos resultados se muestran en la tabla 1.

Ensayo	$U_i \text{ (kV)}$	Ruptura	Ensayo	$U_i \text{ (kV)}$	Ruptura
1	31,7	NO	11	33,6	NO
2	32,65	NO	12	34,55	NO
3	33,6	NO	13	35,5	SI
4	34,55	SI	14	34,55	SI
5	33,6	SI	15	33,6	NO
6	32,65	NO	16	34,55	SI
7	33,6	NO	17	33,6	NO
8	34,55	SI	18	34,55	SI
9	33,6	SI	19	33,6	NO
10	32,65	NO	20	34,55	SI

Tabla 4.7. Resultados de la aplicación de método “Up and down” para impulso de tensión tipo rayo con polaridad positiva y distancia de separación entre esferas 1 cm. [Elaboración propia].

A continuación se ordenan por niveles de tensión los resultados obtenidos y se contabilizan el número de ensayos en los que se ha producido ruptura dieléctrica y en los que no.

Nivel	$U_i \text{ (kV)}$	Ruptura	No ruptura
1	31,7	0	1
2	32,65	0	3
3	33,6	2	6
4	34,55	6	1
5	35,5	1	0
Total		9	11

Tabla 4.8. Resultado de los ensayos clasificados por el nivel de tensión aplicado. [Elaboración propia].

Como se puede observar en la tabla 2 el número de ensayos en los que se ha producido ruptura dieléctrica, $n_{i,b} = 9$, es inferior al número de ensayos en los que no se ha producido, $n_{i,w} = 11$. Como anteriormente se ha indicado, se operará con el

menor de ambos, en este caso $n_{i,b} = 9$, por lo que en la ecuación (1) el signo se tomará negativo.

Antes de determinar la tensión crítica de ruptura $U_{50\%}$ y su desviación típica σ , es necesario calcular las magnitudes N, A y B a partir de las ecuaciones (4.3)-(4.5) respectivamente, las cuales son necesarias para la resolución de las ecuaciones (4.1) y (4.2).

$$N = \sum_{i=0}^k n_{i,b} = 9$$

$$A = \sum_{i=0}^k i \cdot n_{i,b} = 3 \cdot 2 + 4 \cdot 6 + 5 \cdot 1 = 35$$

$$B = \sum_{i=0}^k i^2 \cdot n_{i,b} = 3^2 \cdot 2 + 4^2 \cdot 6 + 5^2 \cdot 1 = 139$$

Y una vez obtenidos estas magnitudes se resuelven las ecuaciones (4.1) y 4.2:

$$U_{50\%} = U_0 + \Delta U \cdot \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) = 31,7 + 0,95 \cdot \left(\frac{35}{9} - \frac{1}{2} \right) = 34,91 \text{ kV}$$

$$\sigma = 1,62 \cdot \Delta U \cdot \left(\frac{N \cdot B - A^2}{N^2} - 0,029 \right) = 1,62 \cdot 0,95 \cdot \left(\frac{9 \cdot 139 - 35^2}{9^2} - 0,029 \right) = 0,45 \text{ kV}$$

4.3.2. Impulso tipo rayo. Polaridad negativa. GAP 1 cm

De nuevo se va a utilizar el método “Up and down” para determina la tensión crítica de ruptura dieléctrica ($U_{50\%}$). La distancia entre esferas es igual que en el ensayo anterior, $S = 1 \text{ cm}$, pero la diferencia con el ensayo anterior es que en este caso se aplica un impulso de tensión con polaridad es negativa. Para ello se invierte el diodo del circuito e generación de impulsos.

Al igual que en el caso anterior el estándar IEEE prevé una tensión de ruptura dieléctrica $U_{50\%} = 31,7 \text{ kV}$ y debido a que las condiciones ambientales del laboratorio fueron las mismas durante ambos ensayos, la tensión de ruptura dieléctrica teórica calculada a partir de la ecuación de Schumann para una presión atmosférica $P = 1,016 \text{ bar}$ y separación entre esferas $S = 1 \text{ cm}$ es $U_b = 31,52 \text{ kV}$.

Para iniciar el método “Up and down” se determina la tensión inicial $U_0 = 33,6 \text{ kV}$ y en consecuencia el incremento $\Delta U = 0,03 \cdot U_0 = 1 \text{ kV}$, a partir de los cuales se inició el método “Up and down” hasta un total de $n = 20$ ensayos.

Ensayo	U_i (kV)	Ruptura	Ensayo	U_i (kV)	Ruptura
1	33,6	SI	11	33,6	SI
2	32,6	NO	12	32,6	SI
3	33,6	SI	13	31,6	NO
4	32,6	NO	14	32,6	NO
5	33,6	SI	15	33,6	SI
6	32,6	NO	16	32,6	NO
7	33,6	SI	17	33,6	SI
8	32,6	NO	18	32,6	NO
9	33,6	SI	19	33,6	SI
10	32,6	NO	20	32,6	NO

Tabla 4.9. Resultados de la aplicación de método “Up and down” para impulso de tensión tipo rayo con polaridad negativa y distancia de separación entre esferas 1 cm. [Elaboración propia].

Se clasifican los resultados obtenidos por niveles de tensión y el número de rupturas dieléctricas producidas en cada nivel de tensión.

Nivel	U_i (kV)	Ruptura	No ruptura
1	31,6	0	1
2	32,6	1	9
3	33,6	9	0
Total		10	10

Tabla 4.10. Resultado de los ensayos clasificados por el nivel de tensión aplicado. [Elaboración propia].

En este caso el número de ensayo en los que se ha producido ruptura dieléctrica y en los que no se ha producido son iguales ($n_{i,b} = n_{i,w} = 10$), por lo sería indiferente cual de los dos valores elegir, pero por analogía con el caso anterior se elige el número de ensayos en los que se ha producido ruptura dieléctrica ($n_{i,b} = 10$), por lo que en la ecuación 1 el signo se tomará negativo.

Se calculan los valores N , A y B a partir de las ecuaciones (4.3), 4.4 y 4.5 respectivamente, los cuales son necesarios para resolver las ecuaciones (4.1) y 4.2 y obtener de esta forma la tensión crítica de ruptura dieléctrica $U_{50\%}$ y su desviación típica σ .

$$N = \sum_{i=0}^k n_{i,b} = 10$$

$$A = \sum_{i=0}^k i \cdot n_{i,b} = 2 \cdot 1 + 3 \cdot 9 = 29$$

$$B = \sum_{i=0}^k i^2 \cdot n_{i,b} = 2^2 \cdot 1 + 3^2 \cdot 9 = 85$$

Y resolviendo las ecuaciones 4.1 y 4.2 se obtiene:

$$U_{50\%} = U_0 + \Delta U \cdot \left(\frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right) = 33,6 + 1 \cdot \left(\frac{29}{10} - \frac{1}{2} \right) = 36 \text{ kV}$$

$$\sigma = 1,62 \cdot \Delta U \cdot \left(\frac{N \cdot B - A^2}{N^2} - 0,029 \right) = 1,62 \cdot 1 \cdot \left(\frac{10 \cdot 85 - 29^2}{10^2} - 0,029 \right) = 0,099 \text{ kV}$$

4.3.3. Impulso tipo rayo. Polaridad positiva. GAP 3,7 cm

En este caso se quiere determinar la tensión crítica de ruptura dieléctrica ($U_{50\%}$) para una separación entre esferas $S = 3,7 \text{ cm}$. El ensayo se va a realizar aplicando un impulso de tensión tipo rayo con polaridad positiva y a partir de los resultados obtenidos se determinará la tensión crítica de ruptura dieléctrica aplicando el método “Up and down”.

Antes de aplicar y obtener el resultado con el método experimental “Up and down” es conveniente conocer la tensión crítica de ruptura dieléctrica que prevé el estándar IEEE para una separación entre explosores de $S = 3,7 \text{ cm}$. Debido a que esta distancia no está normalizada, es necesario interpolar con los valores de la tabla para obtener la tensión de ruptura dieléctrica prevista por el estándar, obteniéndose $U_{50\%} = 100 \text{ kV}$. La tensión de ruptura dieléctrica teórica en función de las condiciones ambientales se determina a partir de la ecuación de Schumann. La presión atmosférica del laboratorio durante el ensayo fue $P = 1,009 \text{ bar}$, por lo que para una separación entre esferas $S = 3,7 \text{ cm}$:

$$U_b = 24,36 \cdot 1,009 \cdot 3,7 + 6,72 \cdot \sqrt{1,009 \cdot 3,7} = 103,93 \text{ kV}$$

Una vez conocidas las estimaciones anteriores, se procede a desarrollar el método “Up and down” para determinar la tensión crítica de ruptura dieléctrica de manera experimental.

En primer lugar se fijó la tensión inicial $U_0 = 92,4 \text{ kV}$ y a partir de ésta el incremento de tensión $\Delta U = 0,03 \cdot U_0 = 2,8 \text{ kV}$. Una vez determinados los datos de partida se procedió a realizar un total de $n = 20$ impulsos, mostrándose a continuación los casos en los que se produjo ruptura dieléctrica y en los que no.

Ensayo	U_i (kV)	Ruptura	Ensayo	U_i (kV)	Ruptura
1	92,4	SI	11	92,4	SI
2	89,6	NO	12	89,6	NO
3	92,4	NO	13	92,4	NO
4	95,2	SI	14	95,2	SI
5	92,4	NO	15	92,4	NO
6	95,2	SI	16	95,2	SI
7	92,4	NO	17	92,4	NO
8	95,2	SI	18	95,2	SI
9	92,4	SI	19	92,4	SI
10	89,6	NO	20	89,6	NO

Tabla 4.11. Resultados de la aplicación de método “Up and down” para impulso de tensión tipo rayo con polaridad positiva y distancia de separación entre esferas 3,7 cm. [Elaboración propia].

Se determinan los niveles de tensión aplicados y se contabilizan los ensayos con y sin ruptura dieléctrica en cada uno de ellos.

Nivel	U_i (kV)	Ruptura	No ruptura
1	89,6	0	4
2	92,4	4	6
3	95,2	6	0
Total		10	10

Tabla 4.12. Resultado de los ensayos clasificados por el nivel de tensión aplicado. [Elaboración propia].

Como se puede observar en la tabla 6 el número de ensayos en los que se ha producido ruptura dieléctrica y en los que no se ha producido son iguales ($n_{i,b} = n_{i,w} = 10$) por lo que para cálculos sucesivos se toma el número de ensayos con ruptura dieléctrica, $n_{i,b} = 10$.

Para poder determinar la tensión crítica de ruptura dieléctrica ($U_{50\%}$) y su desviación típica σ a partir de (4.1) y 4.2 respectivamente, se han de calcular previamente los valores N , A y B con las ecuaciones (4.3), 4.4 y 4.5.

$$N = \sum_{i=0}^k n_{i,b} = 10$$

$$A = \sum_{i=0}^k i \cdot n_{i,b} = 2 \cdot 4 + 3 \cdot 6 = 26$$

$$B = \sum_{i=0}^k i^2 \cdot n_{i,b} = 2^2 \cdot 4 + 3^2 \cdot 6 = 70$$

Para la resolución de la ecuación 4.1 y debido a que se ha elegido el número de ensayos con ruptura dieléctrica para realizar los cálculos y en aplicación del criterio del signo, en este caso, toma signo negativo. Sustituyendo en (4.1) y 4.2 los valores anteriormente calculados se obtiene:

$$U_{50\%} = U_0 + \Delta U \cdot \left(\frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right) = 92,4 + 2,8 \cdot \left(\frac{26}{10} - \frac{1}{2} \right) = 98,28 \text{ kV}$$

$$\sigma = 1,62 \cdot \Delta U \cdot \left(\frac{N \cdot B - A^2}{N^2} - 0,029 \right) = 1,62 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{10 \cdot 70 - 26^2}{10^2} - 0,029 \right) = 0,96 \text{ kV}$$

4.3.4. Impulso tipo rayo. Polaridad negativa. GAP 3,7 cm

A continuación se va a determinar la tensión crítica de ruptura dieléctrica ($U_{50\%}$) de forma experimental aplicando una vez más el método “Up and down”. En este caso se va a aplicar un impulso de tensión tipo rayo de polaridad negativa con una separación entre explosores de $S = 3,7 \text{ cm}$.

Antes de aplicar el método experimental se recuerda que para una separación entre esferas $S = 3,7 \text{ cm}$ la tensión crítica de ruptura dieléctrica prevista por el estándar IEEE interpolando en los datos de la tabla de nuevo es $U_{50\%} = 100 \text{ kV}$ y a partir de las condiciones ambientales bajo las que se llevaron a cabo los ensayos, se establece la tensión de ruptura dieléctrica teórica a partir de la ecuación de Schumann. La presión atmosférica del laboratorio donde se llevaron a cabo los ensayos fue $P = 1,009 \text{ bar}$, por lo que para la separación entre esferas de este caso:

$$U_b = 24,36 \cdot 1,009 \cdot 3,7 + 6,72 \cdot \sqrt{1,009 \cdot 3,7} = 103,93 \text{ kV}$$

Una vez conocidos los valores de las tensiones previstas se procede a aplicar el método “Up and down”. Antes de aplicarlo se fijó la tensión inicial $U_0 = 92,4 \text{ kV}$ y en consecuencia el incremento de tensión $\Delta U = 0,03 \cdot U_0 = 2,8 \text{ kV}$. Una vez conocidos estos valores de partida se llevaron a cabo un total de $n = 20$ impulsos de tensión tipo rayo, obteniendo los siguientes resultados:

Ensayo	U_i (kV)	Ruptura	Ensayo	U_i (kV)	Ruptura
1	92,4	SI	11	92,4	SI
2	89,6	NO	12	89,6	NO
3	92,4	SI	13	92,4	SI
4	89,6	NO	14	89,6	NO
5	92,4	SI	15	92,4	SI
6	89,6	NO	16	89,6	NO
7	92,4	NO	17	92,4	SI
8	95,2	SI	18	89,6	NO
9	92,4	SI	19	92,4	NO
10	89,6	NO	20	95,2	SI

Tabla 4.13. Resultados de la aplicación de método “Up and down” para impulso de tensión tipo rayo con polaridad negativa y distancia de separación entre esferas 3,7 cm. [Elaboración propia].

Posteriormente se cuenta el número de ensayos con y sin ruptura dieléctrica para cada nivel de tensión:

Nivel	U_i (kV)	Ruptura	No ruptura
1	89,6	0	8
2	92,4	8	2
3	95,2	2	0
Total		10	10

Tabla 4.14. Resultado de los ensayos clasificados por el nivel de tensión aplicado. [Elaboración propia].

El número de ensayos en los que se ha producido ruptura dieléctrica y en los que no son iguales ($n_{i,b} = n_{i,w} = 10$) por lo para cálculos sucesivos se podría elegir cualquiera de los dos, pero analogía con casos anteriores se toma el número de ensayos en los que se ha producido ruptura dieléctrica, $n_{i,b} = 10$.

En primer lugar se calculan las magnitudes N , A y B a partir de las ecuaciones (4.3), (4.4) y (4.5).

$$N = \sum_{i=0}^k n_{i,b} = 10$$

$$A = \sum_{i=0}^k i \cdot n_{i,b} = 2 \cdot 8 + 3 \cdot 2 = 22$$

$$B = \sum_{i=0}^k i^2 \cdot n_{i,b} = 2^2 \cdot 8 + 3^2 \cdot 2 = 50$$

Y a continuación se calculan la tensión crítica de ruptura dieléctrica ($U_{50\%}$) y su desviación típica σ con las ecuaciones (4.1) y (4.2) respectivamente.

$$U_{50\%} = U_0 + \Delta U \cdot \left(\frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right) = 92,4 + 2,8 \cdot \left(\frac{22}{10} - \frac{1}{2} \right) = 97,16 \text{ kV}$$

$$\sigma = 1,62 \cdot \Delta U \cdot \left(\frac{N \cdot B - A^2}{N^2} - 0,029 \right) = 1,62 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{10 \cdot 50 - 22^2}{10^2} - 0,029 \right) = 0,59 \text{ k}$$

4.3.5. Resumen datos de rigidez dieléctrica aplicando impulsos de tensión tipo rayo a 50 Hz.

A continuación se muestran los datos obtenidos de tensión de ruptura dieléctrica tanto teórica como experimentalmente aplicando impulsos de tensión tipo rayo al explosor de esferas para distintas separaciones entre explosores y para ambas polaridades.

GAP (cm)	Polaridad	$U_{b \text{ IEEE}}$ (kV)	$U_{b \text{ Teórica}}$ (kV)	$U_{50\%}$ (kV)	σ (kV)
1	Positiva	31,7	31,52	34,91	0,45
1	Negativa	31,7	31,52	36	0,099
3,7	Positiva	100	103,93	98,28	0,96
3,7	Negativa	100	103,93	97,16	0,59

Tabla 4.15. Resumen de tensiones de ruptura dieléctrica obtenidas aplicando impulso de tensión tipo rayo. [Elaboración propia].

Como se puede observar en la tabla 4.15 las tensiones de ruptura dieléctrica obtenidas de forma experimental son cercanas a las obtenidas teóricamente tanto en los ensayos de polaridad positiva como negativa.

La dispersión típica σ indica el grado de dispersión de los datos obtenidos en los diferentes ensayos. Como se puede comprobar en todos los casos se han obtenido valores de σ pequeños, por lo que se puede afirmar que los datos obtenidos no tenían gran entre ellos.

En la tabla 4.16 se muestra una comparativa de las tensiones de ruptura dieléctrica obtenidas en los dos ensayos realizados con el explosor de esferas.

GAP (cm)	$U_{b\text{ IEEE}}$ (kV)	$U_{b\text{ 50Hz}}$ (kV)		$U_{b\text{ Rayo}}$ (kV)				
		$U_{b\text{ Teórica}}$ (kV)	α (kV)	$U_{b\text{ Teórica}}$ (kV)	Polaridad Positiva		Polaridad Negativa	
					$U_{b\text{ 50\%}}$	σ	$U_{b\text{ 50\%}}$	σ
1	31,7	31,52	31,24	31,52	24,91	0,45	36	0,099
3,7	100	104,6	101,78	103,93	98,28	0,96	97,16	0,59

Tabla 4.16: Comparación de tensiones de ruptura dieléctrica obtenidas.

5. Presupuesto

En este apartado se va a desglosar el coste del proyecto “Diseño de un explosor de esferas para aplicaciones de Alta Tensión”. En primer lugar se detalla el coste de los materiales y de la mano de obra empleada en la fabricación del explosor de esferas.

Materiales para la construcción del soporte de sujeción para el explosor de esferas:

Cantidad	Concepto	Precio (€)
1	Listones Haya 70x70 mm	116,16
1	Listones Haya 40x40 mm	114,35
2	Varillas estriadas D. 12 mm	1,98
2	Varillas estriadas D. 10 mm	1,66
2	Piezas en MDF 16 de 64x64 cm	18,32
1	Bote de cola blanca 750 kg	5
2	Ruedas Alex 1-0130	3,28(*)
2	Ruedas Alex 1-0132 (C/Freno)	4,28(*)
1	Porte materiales	20
Total Euros		286,52

*Tabla 5.1: Coste de los materiales para la construcción del soporte de sujeción.
[Elaboración propia].*

Aluminio empleado para la fabricación del explosor de esferas (3 esferas y dos cilindros):

Cantidad	Concepto	Precio (€)
1	Barra 1 m Red. Ext. 2030 T4 110 mm	142,84(*)
1	Barra 500 mm Red. Ext. 2030 T4 110 mm	71,42(*)
1	Porte materiales	20(*)
Total Euros		283,45

*Tabla 5. 2: Coste del aluminio para la fabricación del explosor de esferas.
[Elaboración propia].*

(*) A los materiales marcados se le han de aplicar el 21% de IVA sobre el precio marcado en las tablas 5.1 y 5.2, el cual ya ha sido aplicado para el cálculo del coste total mostrado en dichas tablas.

Por lo que el coste total de los materiales empleados en la construcción del explosor de esferas asciende a:

$$P_{material} = P_{madera} + P_{aluminio} = 569,97 \text{ €}$$

El departamento de Oficina Técnica facilitó la duración y el coste de los trabajos para el montaje del explosor de esferas. Para el diseño de planos, petición de presupuestos y gestión de materiales se emplearon 25 horas con un coste de mano de obra de 75 €/hora. Por otra parte, el tiempo necesario para la fabricación del explosor de esferas fue de 20 horas con un precio de mano de obra 75 €/hora, por lo que el coste total asciende a:

$$P_{m.obra\ explosor} = 25 \cdot 75 + 20 \cdot 75 = 3375 \text{ €}$$

Por otro lado para la redacción del Trabajo Fin de Grado se han empleado 285 horas, desglosadas en el capítulo 6 el número de horas empleadas en cada fase del Trabajo. Para calcular el coste en mano de obra, se ha considerado que dicho Trabajo ha sido desarrollado por un Ingeniero Junior, siendo el coste de mano de obra de 25 €/hora, por lo que el coste total de mano de obra asciende a:

$$P_{m.obra} = 285 \cdot 25 = 7125 \text{ €}$$

Para la elaboración del Trabajo fue necesario la utilización de un ordenador portátil. El coste del portátil es de 700 € ($C_{Total\ pc} = 700 \text{ €}$) con un tiempo de amortización de 2 años ($T_{amortización} = 24 \text{ meses}$), por lo que el coste de amortización del equipo teniendo en cuenta que la duración del Trabajo fue de 8 meses ($T_{TFG} = 8 \text{ meses}$) es:

$$P_{amortizacion\ pc} = \frac{C_{Total\ pc}}{T_{amortización}} \cdot T_{TFG} = 233,33 \text{ €}$$

Finalmente se calcula el coste total del Trabajo Fin de Grado sumando todos los costes indicados anteriormente.

$$P_{TFG} = P_{material} + P_{m.obra\ explosor} + P_{m.obra} + P_{amortizacion\ pc}$$

Ascendiendo el coste total a 11 303,30 € + IVA.

6. Cronograma

A continuación se muestra el tiempo empleado para la realización del Trabajo Fin de Grado. En la tabla 6.1 se muestra un desglose de las distintas fases del Trabajo así como el número de horas empleadas en cada una de ellas y en la tabla 6.2 se representa el diagrama de Gantt dichas tareas.

Tarea	Duración
Documentación (Lectura de textos, normativas...)	50 horas
Dimensionado del explosor de esferas (Capítulo 3)	70 horas
Montaje del explosor de esferas (Oficina Técnica)	45 horas
Ensayos de laboratorio	10 horas
Análisis de los resultados (Capítulo 4)	30 horas
Redacción de TFG (Capítulos 1, 2,5,6 y conclusiones)	80 horas
Elaboración de la presentación	20 horas
Total horas	305 horas

Tabla 6.1: Desglose de las fases del TFG y horas empleadas en cada de ellas.
[Elaboración propia].

Tarea	Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre			
Documentación (Lectura de textos, normativas...)																																
Dimensionado del explosor de esferas																																
Montaje del explosor de esferas																																
Ensayos de laboratorio																																
Análisis de resultados																																
Redacción de TFG																																
Elaboración de la presentación																																

Tabla 6.2: Diagrama de Gantt del TFG. [Elaboración propia].

7. Conclusiones

El objetivo de este TFG era el diseño de un explosor de esferas para aplicaciones de Alta Tensión, el cual se puede emplear como limitador de tensión o interruptor para ciertos ensayos entre otros, en este caso se empleó para el estudio de los valores de tensión de ruptura dieléctrica del aire.

Se considera que el objetivo se ha cumplido puesto que después de realizar el montaje del explosor de esferas, éste cumplía con todos los requisitos técnicos para el correcto funcionamiento y posterior aplicación de Alta Tensión.

Respecto a los resultados obtenidos en los ensayos realizados para determinar de forma experimental las tensiones de ruptura dieléctrica, los datos obtenidos se asemejan a los valores previstos por los estándares internacionales y los obtenidos teóricamente.

El explosor de esferas no solo ha sido diseñado para la elaboración de este TFG, si no que queda como una herramienta útil para el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III para futuras aplicaciones académicas e industriales.

ANEXO I: DESCARGAS PARCIALES

Las descargas parciales “DP” son ionizaciones que se originan por el exceso de campo eléctrico aplicado en zonas no homogéneas del material aislante situado entre dos conductores con diferente potencial.

Las descargas parciales pueden originarse en el interior de aislantes sólidos, líquidos y gaseosos y no causan la ruptura inmediata de éstos pero si son responsables de la degradación paulatina de los aislantes empleados en alta tensión. Estas descargas parciales pueden estar provocadas por algunos defectos en los materiales aislantes como:

- Burbujas, grietas y huecos en el interior de los aislantes.
- Impurezas.
- Presencia de elementos extraños.
- Fallos de diseño en el sistema aislante.
- Degradación de la homogeneidad del aislamiento.

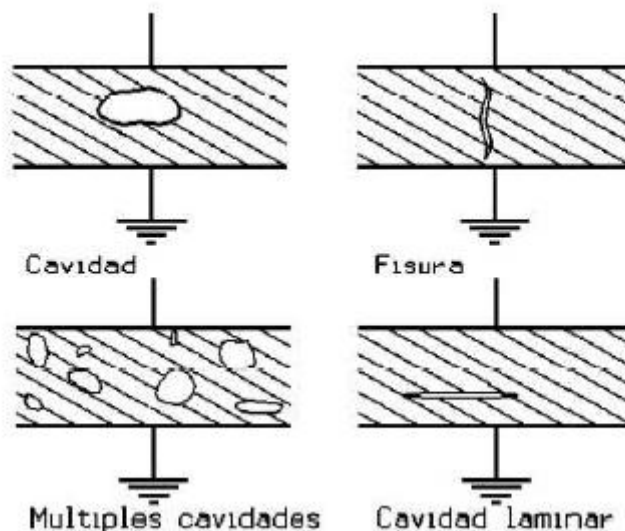


Figura I.1: Ejemplos de defectos en el interior de aislantes sólidos [Bartnikas, R.].

En el interior de estos defectos la rigidez dieléctrica es inferior a la del aislante y debido a la diferencia de permitividades relativas se amplifica el campo total aplicado, siendo éste el origen de la aparición de las descargas parciales.

El test clásico para determinar la presencia de DPs consiste en medir directamente los impulsos de corriente debido a las DPs en equipos energizados a tensión nominal. El medio más común es emplear un condensador de alta tensión con capacidades típicas entre 80 pC y 1000 pC conectado a los terminales del equipo. El pulso de DP que atraviesa el condensador genera un pulso de tensión, el cual se puede mostrar en osciloscopios, analizadores de espectros u otros dispositivos de visualización, creando cada DP un pulso quedando registrado para su estudio posterior. Este no es el único

método de detección de las DPs, ya que éstas producen una serie de efectos a partir de los cuales se han desarrollado métodos para su detección. A continuación se muestran algunos de los efectos y los métodos empleados:

- Transferencia de carga eléctrica (métodos de detección eléctrica).
- Radiación visible y ultravioleta (método de detección óptica).
- Gran aumento local de la temperatura donde se producen la descarga (detectores de temperatura resistivos e infrarrojos).
- Ruido en frecuencias audibles o ultrasónicas provocado por vibraciones provocadas por las ondas de presión que se desplazan dentro del aislamiento (método de detección acústica).
- Formación de gases como el ozono e hidrógeno (métodos de detección por análisis de gases).
- Pérdidas dieléctricas (medida de $\tan \delta$ y capacidad).
- Emisión de radiación electromagnética en todo el espectro de frecuencia (métodos de detección basados en la medida en RF).

Existen tres tipos básicos de descargas parciales atendiendo a su origen: internas, superficiales y efecto corona.

- Descargas parciales internas: Se producen en vacuolas de gas existentes en materiales aislantes sólidos o líquidos y en sólidos presentes en materiales aislantes líquidos. Son las descargas más dañinas pudiendo provocar ruptura y el posterior fallo del material eléctrico.

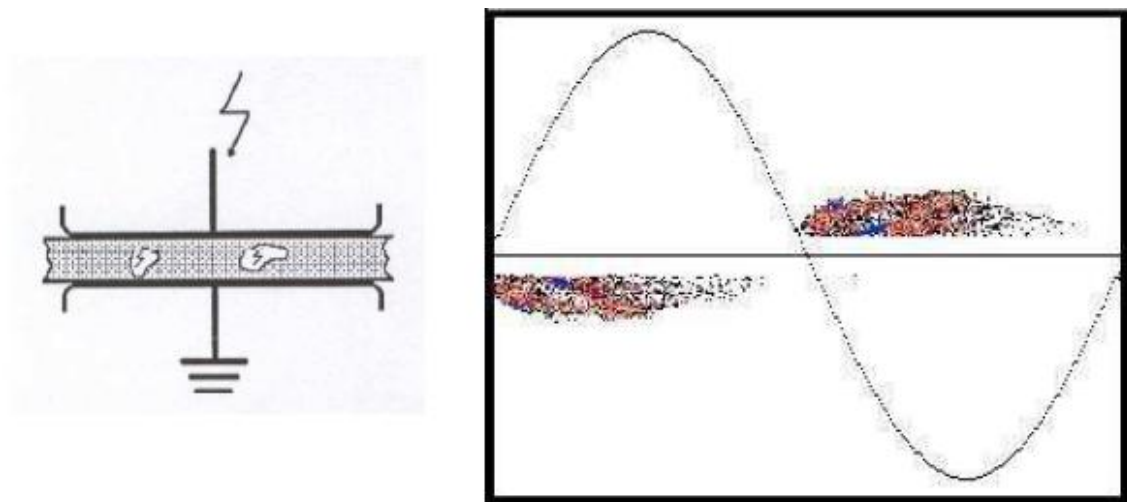


Figura I.2: Fenómeno y ejemplo de patrón característico de descarga parcial interna.[8].

- Descargas parciales internas: Aparecen entre dos dieléctricos, normalmente entre el aislante y el aire, y son debidas a las componentes tangenciales del campo eléctrico. La contaminación o la humedad pueden influir en la aparición de este tipo de descargas parciales. También pueden aparecer en uniones con tornillos, pasos de tuercas y otros elementos eléctricos en tensión.

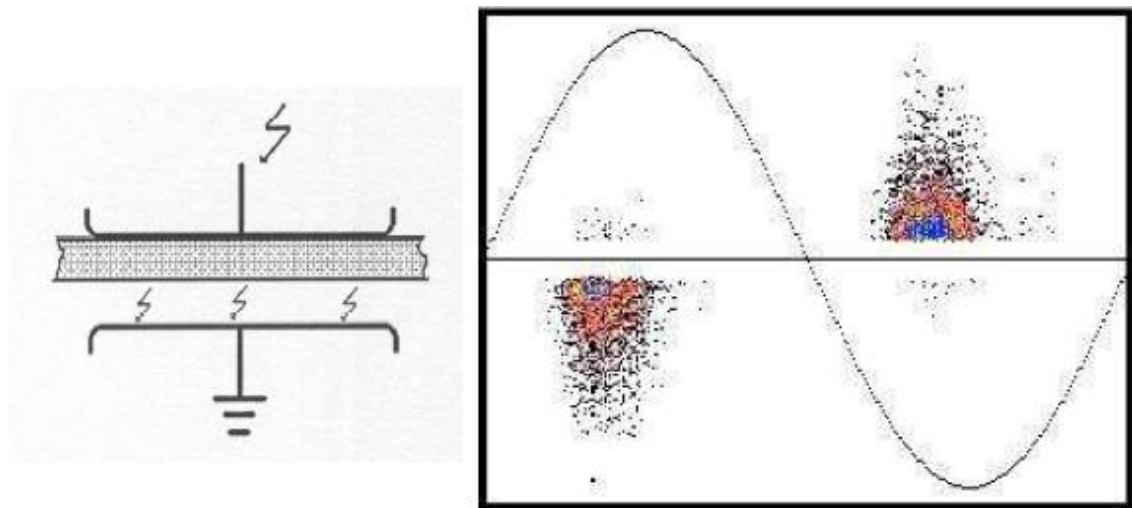


Figura I.3: Fenómeno y ejemplo de patrón característico de descarga parcial superficial. [8].

- Descargas parciales por efecto corona: Se producen en zonas metálicas afiladas en tensión, donde la alta divergencia de campo eléctrico provoca la ruptura del aislamiento que proporciona el gas que lo rodea (generalmente aire). Se produce en elementos externos al circuito como cables o destrenzados, generando ruido y en ocasiones luz visible.

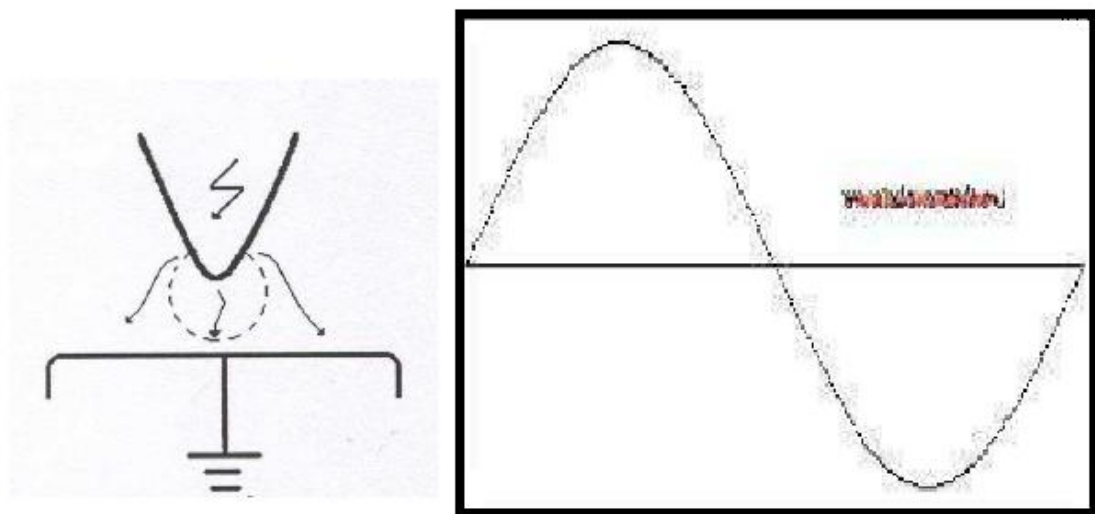


Figura I.4: Fenómeno y ejemplo de patrón característico de descarga parcial efecto corona.[8].

La gravedad de los daños causados por las descargas parciales está relacionada con la magnitud de éstas y a su vez con el tamaño del defecto que produce la descarga parcial. Para determinar la magnitud de las descargas parciales se emplean las siguientes medidas:

- MiliVoltios (mV): Aplicada a objetos inductivos.

- PicoCulumbios (pC): Aplicada a objetos capacitivos. Representa la carga aparente de la descarga parcial y es utilizada en laboratorios de ensayos y fábricas. Requiere de una calibración para cada elemento a medir. MiliAmperios (mA): Aplicada cuando se mide con transformadores de corriente y antenas.
- Decibelios (dBm): Aplicada cuando se emplean analizadores de espectros.

Las descargas parciales son fenómenos estocásticos, variables en el tiempo, por lo que una sola medida de ellas no es significativa. Debido a esto, para conocer la magnitud de las descargas parciales es necesario tratar los datos obtenidos estadísticamente. Para ello, la distribución de pulsos que pertenecen a una única fuente se puede ajustar bien a una distribución estadística Weibull de dos parámetros ([Dissado, 1992]) como la siguiente:

$$P(q) = 1 - e^{-(q/\alpha)^\beta} \quad (1)$$

Donde:

$P(q) \rightarrow$ Probabilidad de tener una descarga con amplitud igual o inferior a “q”.

$\alpha \rightarrow$ Parámetro estadístico de escala.


$\beta \rightarrow$ Parámetro de forma de la distribución.

El parámetro α hace referencia a la magnitud de amplitud que han alcanzado el 63,2% de los pulsos siendo análogo a la definición de media de la distribución normal, y el parámetro β determina la variabilidad de las magnitudes de descargas parciales. Un parámetro pequeño ($\beta \ll 2$) indica una gran variabilidad existiendo gran diferencia entre la máxima y la mínima magnitud de descargas parciales.

Otra variable importante para conocer la magnitud de las descargas parciales es $Q_{\max 95\%}$, la cual informa de la magnitud máxima del 95% de las descargas parciales producidas durante el ensayo. Esta magnitud es la más significativa para medir el estado de un aislamiento.

Anexo II: Facturas

En este anexo se adjuntan las facturas detalladas de los materiales incluidos en el presupuesto del Trabajo Fin de Grado realizado, los cuales han sido empleados en la construcción del explosor de esferas.



C.I.F.: B/84627058

LEGANES: C/. Mayorazgo, 19 - 21 - Tel.: 91 687 84 39 - Fax: 91 680 43 35
 FUENLABRADA: C/. Pico de la Mira, 4 - Tel.: 91 288 58 55 - Fax: 91 288 58 66
 clientes@bricoplus.com

Tableros, Traseras
 Rechapados, Rodapie
 Molduras, cercos
 Puertas, Friso
 Cajoneras, Herrajes
 Cortamos a medida
 Canteamos, Posformados
 en P.V.C.

C/ Pico de la Mira, 4; 28944-FUENLABRADA; TLF. 91 288 58 55 FAX. 91 288 58 66

UNIVERSIDAD CARLOS III UNIVERSIDAD CARLOS III BUTARQUE 15 28911 LEGANES Madrid	FACTURA Nº F/ 6683 Fecha: 13-06-14 Página nº: 1 Albarán Nº: N.I.F.: Q2818029G
--	---

Cantidad	Concepto	Precio	Impor. Eur.	Impor. Pts.
*** ATT: ESTHER AMEZUNA, OFICINA TECNICA ***				
1,00	LISTONES HAYA 70 X 70	116,16	116,16	19.327
1,00	LISTONES HAYA 40 X 40	114,35	114,35	19.026
1,00	2 VARILLAS DE 12 ESTRIADAS	1,98	1,98	329
1,00	2 VARILLAS DE 10 ESTRIADAS	1,66	1,66	276
1,00	1 BOTE COLA BLANCA 750gr	5,00	5,00	832
1,00	2 PIEZAS EN MDF 16 DE 64 X 64	18,32	18,32	3.048
1,00	PORTE	20,00	20,00	3.328

*** Nº DE CUENTA ***

0182 0957 19 0101502255

IBAN ES70 0182 0957 19 0101502255

Base Imponible	% I.V.A.	Importe I.V.A.	TOTAL	
229,31	21,0	48,16	277,47	Euros
1 Euro = 166,386 Pts.	38.154	8.013	46.167	PTS.

Vencimiento: 13-06-14 277,47 Euros

Figura II.1: Factura de la madera empelada para la estructura de sujeción del explosor de esferas.



FERRETERIA ANSERJO.S.A.

A-79198396
C/ISAN ONOFRE,21-23 Apdo. Correos 82
28701 SAN SEBASTIAN DE LOS REYES (MADRID)
TELF:91 653 81 13 FAX: 91 651 95 94
angel@ventas@anserjo.com

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
AVDA. DE LA UNIVERSIDAD. 30

28911 LEGANES
MADRID

JOSE ANTONIO CAMPO

Teléfono: 916246431

Fax: 916246430

Email: ccobos@pa.uc3m.es

PRESUPUESTO

Número Presupuesto	Fecha	Código Cliente	C.I.F.
PS/22802	09/05/2014	1422	Q2818029G

Código	Descripción	Cantidad		Presio	Total
28310130	RUEDA ALEX 1-0130	2,00	UN.	1,54	3,08
0000	RUEDA ALEX 1.0132 / CIFRENO 1	2,00	UN.	2,14	4,28

SUMA TOTAL 7,36

Base Imponible	%	Cuota I.V.A.	%	Cuota R.E.	TOTAL EUR
7,36	21,00	1,59			8,95

Pag. 1

Plazo de entrega:
Portes:
Forma de Pago: TRANSFERENCIA BANCARIA 30 DIAS
Observaciones:

Presupuesto realizado por:	Aceptamos Presupuesto
ANGEL LUIS	Sello y firma de la empresa
	(Nombre del firmante - fecha)

Inscrita en el Registro Mercantil de Madrid, Tomo 9702, gnl. 8400 de la sección 3ª del Libro de Sociedades Libro 6, Folio 137, Hoja nº 74343-3, Inscripción 1ª

Figura II.2: Factura de las ruedas para el soporte del explosor de esferas.

Alumafel
Cami de Ca n'Ametller, 18
08195 Sant Cugat del Valles (Barcelona) -ESPAÑA



Factura
1204194089



90019298

Cliente: 135310
Nº Reg. IVA: ESQ2818229G
Of./Deleg.Vtas.: ALUM INDUS ES CTR-S
Admin. Ventas: LOBO JOSE MARIA
Email: Jose.Maria.Lobo@isapagroup.com

Página: 1/1
Fecha impr.: 12.06.2014
Fecha doc.: 02.06.2014

UNIVERSIDAD CARLOS III
C/ BUTARQUE 15
28911 LEGANES
(Madrid)
España

Expedición: 135036 Ruta: ES01RD Entrega/fecha: 1036457302 / 02.06.2014 Nº Id Entrega externa: -
Dirección envío: UNIVERSIDAD CARLOS III - ATT. JOSE ANTON, OFICINA TECNICA C/ BUTARQUE, 15 EDIFICIO AGUSTIN DE BETANCOURT. E.
Nº Pedido de Venta: 1018160525 Ref. Pedido cliente: EMAIL ESTHER 30-05-2014
NUEVA CUENTA BANCARIA BBVA 0182 3999 38 0206001657

Portes 20E

Pos.	Artículo/Descripción	Precio Base	Surface Treatment / Characteristics	Discount/Surcharge	Total Neto Curr.	IVA
10	L-Q23041100 RED. EXT. 2000 T4 110 MM					
	26,800 KG	5,33 /t KG			142,84	EUR UM
	1 BARRA A 1 METRO					
20	L-Q23041100 RED. EXT. 2000 T4 110 MM					
	13,400 KG	5,33 /t KG			71,42	EUR UM
	1 BARRA A 500 mm					

Importe Neto	214,26
Rec.Transp.Norm.(he)	20,00
Base Imponible	234,26
IVA (UM)	49,19
Importe Total	283,45

Condiciones envío/Incoterms: EXWEn Fábrica - 1001

Condiciones de pago: Transferencia Bancaria, 15 días fecha factura

Vencimiento: 17.06.2014

Cliente: UNIVERSIDAD CARLOS III
CL MADRID 126
28903 GETAFE
(Madrid)
España

HYDRO-BUILDING SYSTEMS SOUTHWEST S.L.U., es una Sociedad con capital social 34.800.012,40 €, inscrita en el Registro Mercantil de Barcelona, Tomo 43.040, Folio 291, Hoja 5-91559 Inscripción 147. C.I.F. B-08295382 con Sede social Camí de Ca n'Ametller 18, 08195 Sant Cugat del Valles (Barcelona). Tel +34 93 573 77 77 - Fax +34 93 582 22 50

Figura II.3: Factura del aluminio empleado para el explosor de esferas.

Referencias bibliográficas

- [1] Kuffel, E., Zaengl, W. S., Kuffel, J., High Voltage Engineering: Fundamentals, Newnes, 2000.
- [2] Bartnikas, R., Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002.
- [3] Albarracín S., Ricardo, Tesis Doctoral: Medida de descargas parciales en radiofrecuencia, Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
- [4] Docavo M., Isabel, PFC: Separación de Fuentes de Descargas Parciales Mediante el Equipo PDBase, Universidad Carlos III de Madrid, 2008.
- [5] Martínez Tarifa, Juan M., Apuntes asignatura Alta Tensión, Tema 2: Materiales aislantes empleados en Alta Tensión, Universidad Carlos III de Madrid.
- [6] Martínez Tarifa, Juan M., Apuntes asignatura Alta Tensión, Tema 3: Dispositivos para ensayos en sistemas de aislamiento, Universidad Carlos III de Madrid.
- [7] Martínez Tarifa, Juan M., Apuntes asignatura Alta Tensión, Tema 4: Diseño de sistemas de aislamiento, Universidad Carlos III de Madrid.
- [8] Martínez Tarifa, Juan M., Apuntes asignatura Alta Tensión, Tema 6: Métodos de evaluación de equipamiento eléctrico de Alta Tensión, Universidad Carlos III de Madrid.
- [9] Bheema S., Paraselli, Tesis of Master: Measurement of air Breakdown Voltage and Electric Field using standad Sphere Gap Method, Rourkela, India, Junio 2011.
- [10] Álvarez C., Jean Paul, TFG: Tensión de chispa. Determinación y tratamiento estadístico de los datos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.
- [11] Sanz Feito, J., Martinez Tarifa, J. M., Gomez Solanilla, A. M., Santos, E., Caracterización de sistemas de aislamiento de maquinaria rotativa empleando detección de descargas parciales, Leganés, Madrid.
- [12] Dissado, L. A., Fothergill, J. C., Electrical Degradation and Breakdown in Polymers, London, 1992.
- [13] IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques (IEEE Std 4TM-2013), IEEE Power and Energy Society, New York, May 2013.
- [14] International Standard, Protection against lightning – Part 1: General principles (IEC 62305-1), Geneva, Switzerland, 2010.
- [15] <http://home.earthlink.net/~jimlux/hv/sphgap.htm>